

DETERMINACIÓN DE LAS EMISIONES EN REGÍMENES DE ESTADO ESTABLE
DE UN VEHÍCULO LIVIANO OPERANDO CON MEZCLA DE ETANOL Y
GASOLINA, E20

Ing. Sebastián Ospina Castro

Programa de Maestría en Ingeniería Mecánica

Facultad de Ingeniería Mecánica

Universidad Tecnológica de Pereira

Pereira, 2014

DETERMINACIÓN DE LAS EMISIONES EN REGÍMENES DE ESTADO ESTABLE
DE UN VEHÍCULO LIVIANO OPERANDO CON MEZCLA DE ETANOL Y
GASOLINA, E20

Presentado por:

Ing. Sebastián Ospina Castro

Código: 45173421

Dirigido por:

Ph. D. Juan Esteban Tibaquirá Giraldo

Programa de Maestría en Ingeniería Mecánica

Facultad de Ingeniería Mecánica

Universidad Tecnológica de Pereira

Pereira, 2014

Nota de aceptación:

Firma del presidente del jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

Pereira, 20 de noviembre de 2014

Dedicatoria

A mis padres Luis Alonso y Beatriz por animarme siempre a ir hacia adelante.

A mis hermanos Felipe, Viviana, Paola y a sus hijos por su incondicional apoyo a todas las luchas que emprendo y por estar presentes en cada momento.

A mis compañeros y amigos que me dan ánimo para superar la adversidad.

Agradecimientos

Quiero agradecer a mi director de investigación Dr. Juan Esteban Tibaquirá por creer en mí para desarrollar este proyecto y guiarme en varias etapas de mi formación.

Al Dr. José Ignacio Huertas le agradezco su continuo asesoramiento, el permitirnos realizar pruebas y darme la oportunidad de estar en el programa de estancias para jóvenes investigadores de alto desempeño del Centro de Investigación en Mecatrónica Automotriz - CIMA que a bien tiene por dirigir, así como su contribución a la investigación formando a muchos de los que actualmente en nuestro país somos los llamados a liderar procesos tanto investigativos como de planeación energética.

Agradezco a mis compañeros del Laboratorio de Pruebas Dinámicas Automotrices – LPDA, Luis Felipe, Alexander, Andrés, Juliana, Luis Guillermo y a todos los que en este espacio de investigación hicieron posible la realización de este trabajo.

A mis compañeros del Centro de Investigación en Mecatrónica Automotriz – CIMA, Esteban, Marco, David, Nicolás, Daniel, Teresa y a todos aquellos que contribuyeron durante mi estancia en Toluca para la realización de las pruebas aportando parte de su trabajo para el desarrollo de esta investigación les agradezco el haber estado ahí para apoyarme incondicionalmente.

Finalmente agradezco a la Vicerrectoría de Investigación Innovación y Extensión de la Universidad Tecnológica de Pereira en cabeza del Ing. José Germán López por financiar gran parte de este proyecto y apoyar las diferentes iniciativas que surgen desde el LPDA.

CONTENIDO

	Pág.
1. Introducción.....	11
1.1. Etanol como combustible.....	12
1.2. Estándares y pruebas de emisiones	17
1.2.1. Colombia.....	17
1.2.2. México	19
1.2.3. Estados Unidos	20
1.3. Pruebas en estado estable de operación	22
2. Revisión bibliográfica	29
2.1. Estudios con flotas cautivas, pruebas de larga duración	29
2.2. Estudios con motores en bancos de pruebas.....	31
2.3. Estudios pruebas en estado estable de operación	31
3. Metodología experimental.....	33
3.1. Variables a seguir	35
3.2. Matriz de pruebas	35
3.3. Pruebas en el LPDA – UTP (Pereira, Colombia)	36
3.3.1. Vehículo probado en el LPDA - UTP (Pereira, Colombia).....	37
3.4. Pruebas CIMA - ITESM (Toluca, México).....	38
3.4.1. Motor de probado en el CIMA - ITESM (Toluca, México).....	38
3.5. Cálculo de los índices de emisión	40
3.5.1. Cálculo teórico de los índices de emisión	40

3.5.2. Cálculo de los índices de emisión prácticos	44
4. Resultados fase experimental	45
4.3.2. Análisis comparativo del comportamiento del flujo másico de combustible (Pereira –vs- Toluca).....	67
4.3.3. Análisis comparativo del comportamiento del Dióxido de Carbono - CO ₂ (Pereira-vs-Toluca).....	67
4.3.4. Análisis comparativo del comportamiento del Monóxido de Carbono – CO (Pereira –vs- Toluca).....	68
4.3.5. Análisis comparativo del comportamiento de los hidrocarburos no quemados – HC (Pereira-vs-Toluca).....	68
4.3.6. Análisis comparativo del comportamiento del Oxígeno - O ₂ (Pereira-vs-Toluca)	69
4.3.7. Análisis comparativo del comportamiento de los Óxidos de Nitrógeno – NO _x (Pereira-vs-Toluca).....	69
5. Conclusiones y recomendaciones	71
5.1. Conclusiones:	71
5.2. Resultados:	72
5.3. Recomendaciones:	73
BIBLIOGRAFÍA	75
ANEXOS	78
Anexo 1. Equipos utilizados en el LPDA - UTP (Pereira, Colombia)	78
Anexo 2. Equipos utilizados en el CIMA - ITESM (Toluca, México)	81

LISTADO DE TABLAS:

	Pág.
Tabla 1 Características comparativas entre el etanol y la gasolina	13
Tabla 2 Límites máximos de emisión permisibles para vehículos accionados con gasolina en velocidad de cruce y en condición de marcha mínima, ralentí o prueba estática	17
Tabla 3 Límites máximos de emisión permisibles para vehículos livianos y medianos accionados con gasolina en prueba dinámica, evaluados mediante ciclos de Estados Unidos (FTP-75)	18
Tabla 4 Límites máximos de emisión permisibles para vehículos livianos y medianos accionados con gasolina en prueba dinámica, evaluados mediante ciclos de la Unión Europea (ECE-15+EUDC)	18
Tabla 5 Límites máximos permisibles de emisiones en prueba estática para los vehículos automotores que circulan en todo México.....	19
Tabla 6 Límites máximos permisibles de emisiones bajo prueba estática para el Estado de México	19
Tabla 7 Estándares de emisiones EPA Tier 1, FTP 75 [g/milla]	20
Tabla 8 Límites máximos de emisiones SFTP [g/milla]	22
Tabla 9 Condiciones de operación European Steady-state Cycle ESC (Dieselnet, 2013) ...	24
Tabla 10 Matriz de pruebas	36
Tabla 11 Ficha técnica Chevrolet Sail (General Motors, 2014)	37
Tabla 12 Ficha técnica motores probado en el CIMA ITESM - Toluca (General Motors, 2014)	39
Tabla 13 Comparativo cálculos de propiedades en modelo de combustión CIMA y modelo ciclo Otto tradicional	41
Tabla 14 Ficha técnica analizador de emisiones Galio SMART XXX	78
Tabla 15 Ficha técnica dinamómetro Dynapack	80
Tabla 16 Ficha técnica dinamómetro Super Flow F-902	82
Tabla 17 Características analizador de emisiones FGA-4000XD	84

Tabla 18 Características bujía sensor de presión Kistler.....	86
Tabla 19 Características tacómetro.....	87

TABLA DE FIGURAS:

	Pág.
Figura 1. Solubilidad en de agua mezclas etanol-gasolina.....	14
Figura 2. European Steady-state Cycle ESC	23
Figura 3. Montaje experimental LPDA UTP - Pereira.....	34
Figura 4. Montaje experimental CIMA ITESM - Toluca.....	34
Figura 5. Vehículo de pruebas Pereira - Chevrolet Sail 1,4L.....	37
Figura 6. Motor Chevy probado en el CIMA ITESM – Toluca	39
Figura 7. Diagrama P-V comparativo ciclo Otto Teórico y Modelo CIMA	42
Figura 8. Ambiente software GASEQ.....	43
Figura 9. Ambiente software EES programa cálculo de los índices de emisión	44
Figura 10. Potencia pruebas CIMA ITESM	46
Figura 11. Flujo másico de combustible pruebas CIMA ITESM.....	47
Figura 12. CO ₂ pruebas CIMA – ITESM, (a) [%], (b) [g/kWh], (c) [g/km]	48
Figura 13. CO pruebas CIMA –ITESM, (a) [%], (b) [g/kWh], (c) [g/km]	50
Figura 14. HC pruebas CIMA – ITESM, (a) [ppm], (b) [g/kWh], (c) [g/km]	52
Figura 15. O ₂ pruebas CIMA – ITESM, (a) [%], (b) [g/kWh], (c) [g/km].....	53
Figura 16. NO pruebas CIMA –ITESM, (a) [ppm], (b) [g/kWh], (c) [g/km]	55
Figura 17. Potencia pruebas LPDA UTP.....	57
Figura 18. Flujo másico de combustible pruebas LPDA UTP	58
Figura 19. CO ₂ pruebas LPDA UTP, (a) [%], (b) [g/kWh], (c) [g/km]	59
Figura 20. CO pruebas LPDA UTP, (a) [%], (b) [g/kWh], (c) [g/km].....	61
Figura 21. HC pruebas LPDA UTP, (a) [ppm], (b) [g/kWh], (c) [g/km]	63
Figura 22. O ₂ pruebas LPDA UTP, (a) [%], (b) [g/kWh], (c) [g/km]	64
Figura 23. Vehículo de prueba instalado en el dinamómetro Dynapack.....	79
Figura 24. Parte interna dinamómetro de cubos	80
Figura 25. Módulo de consumo de combustible LPDA	81

Figura 26. Dinamómetro Super Flow F-902	82
Figura 27. Validación medida del par de torsión con celda de carga dinamómetro Superflow F-902.....	83
Figura 28. Analizador de emisiones Infrared FGA-4000XD	84
Figura 29. Bujía sensor de presión Kistler	85
Figura 30. Reconocimiento de la señal de la bujía sensor de presión Kistler	86
Figura 31. Verificación tacómetro dinamómetro Superflow F-902	88
Figura 32. Tanque auxiliar de combustible	88
Figura 33. Cámara DVT	89

1. Introducción

La tendencia mundial hacia el uso de combustibles alternativos y renovables en los sistemas de transporte se convierte en una salida real, que cada día es reafirmada por la escasez y los altos precios del petróleo, acompañada por la problemática de cambio climático latente. Ambos factores contribuyen a la destrucción acelerada de nuestro ecosistema y a la generación de conflictos económicos y sociales. En Colombia se utilizan combustibles renovables como las mezclas etanol – gasolina con el propósito de reducir las emisiones vehiculares contaminantes, mitigar la dependencia actual de los combustibles fósiles y promover el uso energético de los recursos renovables disponibles en el país.

El uso de etanol como combustibles para el transporte ha estado ligado al nacimiento de los automóviles. En 1894, mientras Louis Renault, Armand Peugeot, Herbert Austin, Henry Ford, Karl Benz y otros intentaban adaptar el motor de combustión interna recientemente inventado en vehículos, simultáneamente en Francia y Alemania se investigaba como llevar a cabo la utilización del etanol y biodiesel en estos motores (Olvera, 2010). Desde entonces y hasta nuestros días, el uso del etanol en vehículos automotores ha tenido un considerable avance, principalmente porque su uso reduce la dependencia del petróleo y se amplían las fuentes de energía alternativas para uso automotor.

Colombia no ha sido ajena a esta realidad, en este sentido las entidades gubernamentales han planteado la política nacional de alcoholes carburantes a partir de la ley 693 de 2001. A través de este programa en noviembre de 2005 entró en vigencia el uso de mezcla E10 en las grandes urbes del país, según la resolución 18 1069 de agosto 18 de 2005 para las ciudades de la región centro – occidente del país y la resolución 18 1761 de diciembre 26 de 2005 para la ciudad de Bogotá. La mezcla se fue incrementando gradualmente en cada una de las ciudades colombianas hasta masificar su consumo. Actualmente se usa una mezcla entre el 8% y el 10% de etanol en la gasolina en el territorio Nacional.

El uso e incremento de las mezclas debe contemplar pruebas sobre el parque automotor en las que se analice el comportamiento mecánico y ambiental, utilizando mezclas etanol-

gasolina. Para ello, desde el año 2005, la Universidad Tecnológica de Pereira en asocio con Ecopetrol y el Ministerio de Minas y Energía han unido esfuerzos en busca del desarrollo de proyectos de investigación que tengan por objetivo central la determinación del impacto producido por el uso de la mezcla etanol-gasolina en los vehículos que circulan actualmente en el país (Rios L.C, 2012).

La prueba dinámica de emisiones es el procedimiento avalado a nivel internacional para certificar y controlar el grado de contaminación por emisiones emitido de una fuente móvil (vehículo). A través de la resolución 2604 de diciembre de 2009, los ministerios de Minas y Energía, de la Protección Social, y de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, dictan medidas acerca de los límites permisibles que deben cumplir los vehículos que operan en Colombia. A partir de esta base legal, se busca en esta investigación determinar la variación cualitativa y cuantitativa de las emisiones vehiculares a partir del uso de diferentes mezclas etanol – gasolina mayores a los porcentajes actualmente utilizados en Colombia.

Dentro de las políticas establecidas por el programa nacional de alcohol carburante se contempla la posibilidad de realizar aumentos graduales del contenido de etanol en la mezcla etanol-gasolina, no obstante, estas disposiciones deben estar argumentadas con estudios técnicos que evalúen el impacto que pueda generar esta nueva mezcla sobre los vehículos, el ambiente y la salud pública.

1.1. Etanol como combustible

El etanol también denominado alcohol etílico, es una sustancia con fórmula molecular C_2H_5OH , que puede ser utilizado como combustible en motores de combustión interna con ignición a chispa (ciclo Otto) de dos maneras: 1) en mezclas de gasolina y etanol anhidro; o 2) como etanol puro, generalmente hidratado. En la siguiente tabla se sintetizan las principales características del etanol, (BNDES, 2008)

Tabla 1 Características comparativas entre el etanol y la gasolina

Parámetro	Unidad	Gasolina	Etanol
Poder calorífico inferior	kJ/kg	43500	28225
	kJ/litro	32180	22350
Densidad	kJ/litro	0,72 - 0,78	0,792
Octanaje RON (Research Octane Number)	-	90 - 100	102 - 130
Octanaje MON (Motor Octane Number)	-	80 - 92	89 - 96
Calor latente de vaporización	kJ/kg	330 - 400	842 - 930
Relación Aire/Combustible estequiométrica	-	14,5	9
Presión de vapor	kPa	40 - 65	15 - 17
Temperatura de ignición	°C	220	420
Solubilidad en agua	% V/V	0	100

Fuente: (API, 1998) (Goldemberg, 1994)

El alcohol se obtiene a partir de recursos renovables, como biomásas procedentes de diversos cultivos, e incluso de productos desechados tales como residuos de papel, hierba y recortes de árboles entre otros.

El etanol tiene como ventaja, frente a la gasolina, el hecho de ser una sustancia pura que independiente de su origen, mantiene sus propiedades. Mientras que la gasolina física y químicamente es más diversa que el etanol, lo que exige procedimientos complejos de refinación para asegurar la fabricación de una gasolina consistente en el tiempo (Agarwal, 2007).

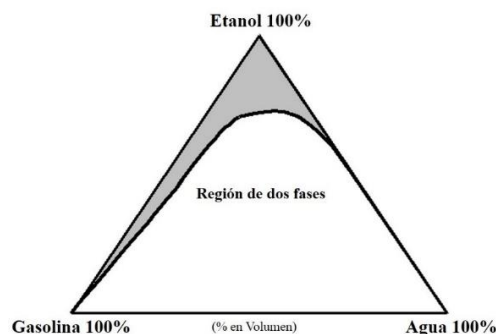
Entre los aspectos que hay que tener en cuenta a la hora de implementar el uso del etanol en la gasolina, se encuentra el hecho de que cuando se realiza la mezcla, se genera un nuevo combustible, con algunas propiedades características distintas del valor determinado por la ponderación directa de las propiedades de cada componente, a causa del comportamiento no lineal de ciertas propiedades. Una de las propiedades que se analizan en los casos de implementación de las mezclas de etanol-gasolina es el octanaje. Esta es una medida de la resistencia de un combustible a la auto-ignición y a la detonación; la cual se ha demostrado que mejora al aumentar la cantidad de etanol en la mezcla etanol-gasolina. Además el etanol

con su implementación como aditivo de la gasolina, permitió en algunos países del mundo eliminar el uso de otros aditivos como el tetraetilo de plomo o el metil tert-butil éter - MTBE, que a pesar de actuar como antidetonantes, ocasionaron problemas ambientales (BNDES, 2008).

La separación de fases surge como un problema asociado con el uso de las mezclas de etanol-gasolina; la posibilidad de que este fenómeno suceda se asocia a al riesgo de que sea introducida agua al momento de adicionar el etanol, o se condense en el tanque de almacenamiento de combustible del vehículo, causando problemas para el normal funcionamiento del motor. Diversos estudios indican que este problema tiende a crecer con el contenido de etanol en la gasolina. Mientras que la gasolina sola no absorbe agua, el etanol anhidro tiene características higroscópicas y las mezclas etanol-gasolina tienen una capacidad de disolver agua directamente proporcional a la concentración alcohólica, como se indica en el diagrama ternario que se muestra en la

Figura 1. Cuanto más elevada es la concentración de etanol en la gasolina, más ancha es la franja que define la región donde ocurre total solubilidad, como se observa en la parte superior del diagrama. A temperaturas muy bajas, este efecto es menos intenso, pero de todos modos, el etanol siempre actúa como un co-solvente entre la gasolina y el agua, reduciendo el riesgo de la separación de fase acuosa de la gasolina (BNDES, 2008).

Figura 1. Solubilidad en de agua mezclas etanol-gasolina



(BNDES, 2008)

Cuando se piensa en el uso de etanol puro (E100) como combustible en un motor de combustión interna es necesario tener en cuenta que dicho motor necesita una serie de

modificaciones o adaptaciones para tal fin. Mientras que el uso de mezclas menores de etanol-gasolina (E5, E10, E15 y E20) en algunos casos es posible sin necesidad de modificaciones o adaptaciones al motor (Rios L.C, 2012).

Desde el año 1986 en Colombia se han realizado estudios asociados al uso de mezclas gasolina etanol y su aplicación en los vehículos. De estos estudios se resalta el realizado por la Universidad Industrial de Santander sobre los efectos de la mezcla etanol-gasolina en dos de vehículos, un Simca 1300 cm³ y un Renault 4.

Ya para el año 2004, previo a la comercialización de la mezcla E10 como combustible aplicable en vehículos y motocicletas en Colombia, diferentes entidades e instituciones de la academia, el gobierno y los productores de biocombustibles, desarrollaron algunas investigaciones encaminadas a estudiar el comportamiento de esta mezcla en los vehículos, así como a divulgar el uso de la mezcla E10 entre los colombianos. En ese mismo año la Universidad Santo Tomás de Aquino realizó un estudio en el que se ensayó un motor operando con mezcla E10 durante 1000 horas, paralelamente la empresa petrolera colombiana ECOPETROL presentó un informe en el que se muestran las diferentes características físico-químicas de la mezcla (Torres. J, 2002).

La Universidad Tecnológica de Pereira con el acompañamiento de la Federación Nacional de Biocombustibles de Colombia, el Ministerio de Minas y Energía y la importadora de Volkswagen en Colombia realizó en los años 2005 y 2007 varios recorridos por algunas regiones del territorio nacional, ejecutando giras de divulgación, del que en ese momento era un nuevo combustible para los colombianos, como lo fue el E10.

En el año 2009 la Universidad de Antioquia se asoció con la empresa ensambladora de vehículos SOFASA y el Ministerio de Agricultura para realizar un estudio denominado “Evaluación energética y ambiental del bioetanol de yuca en motores”, en el cual realizaron pruebas a un vehículo marca Renault operando con mezcla gasolina etanol E20 por carreteras cercanas al municipio de Medellín. Dentro de este mismo estudio se desarrollaron pruebas con un motor de la misma casa fabricante en un banco dinamométrico para motores, evaluando el comportamiento de éste haciendo uso de mezcla E20 (Baena L. M., 2012).

En ese mismo año 2009, la Universidad Tecnológica de Pereira desarrolló el proyecto de investigación en biocombustibles y transporte denominado PROTOCOLO E12 - E15, el cual fue desarrollado conjuntamente con el apoyo del sector azucarero colombiano representado por ASOCAÑA. Los alcances de este proyecto contemplaron la realización de pruebas de corta duración sobre 24 vehículos de prueba, seleccionados aleatoriamente del parque automotor colombiano, los cuales fueron probados con mezclas E0, E10, E12 y E15 a través de pruebas de laboratorio y de ruta, analizando las prestaciones de cada uno de ellos y comparando entre si las distintas mezclas etanol-gasolina utilizadas (Rios L.C, 2012) (Martha Amaya, 2013).

En la actualidad las investigaciones se concentran en desarrollar vehículos que permitan el uso de mezclas etanol-gasolina, y en algunos casos vehículos que usen etanol como único combustible.

En comparación con la gasolina pura, la mezcla de etanol-gasolina E10 requiere 16,5% más calor para vaporizarse totalmente, lo que puede ser una dificultad al momento de operarlo a temperaturas muy bajas. Frente a la eficiencia del motor se espera que el mayor calor de vaporización de la mezcla E10, proporcione un aumento entre el 1% y el 2% con relación al desempeño con gasolina sin el aditivo oxigenante. De esta forma, aunque una gasolina con 10% de etanol contenga 3,3% menos de energía por unidad de volumen, el efecto final sobre el consumo de combustible es menor y depende de las condiciones particulares de uso.

Para bajas concentraciones de etanol en la gasolina (<10%), se prevé un leve efecto sobre el consumo de combustible; pero para concentraciones más elevadas como 25% de etanol, que corresponde a un contenido energético en volumen un 10% inferior, se observa un aumento promedio del consumo del 3% al 5%, comparándolo con la gasolina sin etanol. Estos resultados, confirmados en muchos ensayos de campo, indican como el etanol, aunque tiene menos poder calorífico, permite mejorar la eficiencia del motor, gracias a la menor temperatura en la ignición y al mayor volumen de los productos de combustión.

La combustión de las mezclas etanol-gasolina y del etanol puro en motores, en comparación a las gasolinas típicas sin el aditivo oxigenante; produce menores emisiones de monóxido de carbono (CO), óxidos de azufre (SO_x), hidrocarburos no quemados (HC) y otros compuestos

contaminantes, como reflejo de una combustión más completa. Al mismo tiempo, se elevan los aldehídos (compuestos tipo R-CHO) y dependiendo de las características del motor, los óxidos de nitrógeno (NO_x). Normalmente, los límites legales de emisión para los vehículos se cumplen totalmente. (BNDES, 2008)

1.2. Estándares y pruebas de emisiones

En esta sección se hace un análisis con respecto a los límites y pruebas exigidas para las emisiones vehiculares en Colombia y México por ser los países en los que se realizaron pruebas y los Estados Unidos por ser referente mundial en temas de emisiones.

A continuación se hace una breve descripción de los límites de emisión para vehículos livianos a gasolina que rigen en los países anteriormente mencionados.

1.2.1. Colombia

En este país la resolución 910 del año 2008 reglamenta límites y pruebas de emisiones que deben cumplir las fuentes móviles terrestres haciendo una clasificación según el año de fabricación de los vehículos así como el tipo de prueba. Los límites máximos de emisiones permisibles en Colombia para prueba estática se muestran en la siguiente tabla. (Minambiente, 2008)

Tabla 2 Límites máximos de emisión permisibles para vehículos accionados con gasolina en velocidad de cruce y en condición de marcha mínima, ralentí o prueba estática

Año modelo	CO [%]	HC [ppm]
1970 y anteriores	5.0	800
1971 - 1984	4.0	650
1985 - 1997	3.0	400
1998 y posteriores	1.0	200

Esta resolución en el párrafo 1° condiciona que cuando la concentración de O₂ exceda el 5% o la concentración de CO₂ sea inferior al 7%, se entenderá que existe dilución de la

muestra y el vehículo automotor deberá ser rechazado en la prueba de emisiones estáticas. También en el parágrafo 2° de la resolución 910 se indica que a partir de los vehículos año modelo 2010, los comercializadores representantes de marca, importadores, fabricantes o ensambladores de dichos vehículos deberán garantizar una emisión máxima permisible equivalente al 80% del valor establecido en la Tabla 1 para los vehículos con año modelo 1998 y posterior.

Otro tipo de ensayo que se realiza a los vehículos automotores en Colombia pero solamente a una muestra del lote de fabricación, es la homologación que consiste en una prueba dinámica de medición de emisiones bajo un ciclo de manejo preestablecido.

En el caso colombiano se adoptan dos ciclos de medición de emisiones en prueba dinámica como lo son el Procedimiento de Prueba Federal FTP 75 (Federal Test Procedure) de origen estadounidense y el Ciclo de Manejo Extra Urbano de la Comisión Económica Europea de las Naciones Unidas ECE-15+EUDC; los límites máximos permisibles de emisión para vehículos livianos ensayados mediante estos ciclos son los que se muestran en las siguientes tablas:

Tabla 3 Límites máximos de emisión permisibles para vehículos livianos y medianos accionados con gasolina en prueba dinámica, evaluados mediante ciclos de Estados Unidos (FTP-75)

Tipo de vehículo	CO [g/km]	HC [g/km]	HCNM [g/km]	NO _x [g/km]
Vehículo liviano - LDV	2,11	0,25	0,16	0,25

Tabla 4 Límites máximos de emisión permisibles para vehículos livianos y medianos accionados con gasolina en prueba dinámica, evaluados mediante ciclos de la Unión Europea (ECE-15+EUDC)

Tipo de vehículo	CO [g/km]	HC+NO _x [g/km]
M1*	2,11	0,25

*M1= Vehículo de pasajeros con mínimo cuatro ruedas y hasta nueve pasajeros. Conforme a la clasificación Europea.

1.2.2. México

En México la entidad encargada de la regulación de emisiones es la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, entidad que bajo la norma oficial mexicana NOM-SEMARNAT-2006 establece los límites máximos permisibles de emisiones de gases contaminantes provenientes del tubo de escape de los vehículos automotores en circulación que usan gasolina como combustible.

La legislación mexicana hace una clasificación dependiendo de la zona en la cual circulen los vehículos automotores teniendo unos límites máximos permisibles para toda la República y otros para el Estado de México como se indica en las dos tablas que se muestran a continuación. (SEMARNAT, 2007)

Tabla 5 Límites máximos permisibles de emisiones en prueba estática para los vehículos automotores que circulan en todo México

Año modelo	HC [ppm]	CO [%]	O ₂ [%]	Dilución	
				Min.	Máx.
1994 y posteriores	100	1,0	3,0	13	16,5

Tabla 6 Límites máximos permisibles de emisiones bajo prueba estática para el Estado de México

Año modelo	HC [ppm]	CO [%]	O ₂ [%]	NO [ppm]	Dilución		Λ
					Min.	Máx.	
1991 y posteriores	100	1,0	3,0	1 500	13	16,5	1,05

Para pruebas dinámicas el gobierno mexicano estipula acoger las regulaciones planteadas por Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos – EPA, por sus siglas en inglés, y se sugiere el ciclo de manejo FTP 75 como metodología de prueba.

1.2.3. Estados Unidos

La EPA es la autoridad ambiental encargada en los Estados Unidos de definir los límites máximos permisibles de emisiones vehiculares, ellos han planteado una serie de normatividades como referencia para definir los límites de emisiones contaminantes entre las cuales se destacan Tier 1, Tier 2 y Low Emission Vehicles – LEV.

La normatividad Tier 1 se aplica para todos los vehículos livianos nuevos. Dependiendo del combustible que utilicen los vehículos existen límites máximos para las emisiones. Por ejemplo para los vehículos a gasolina los límites para los óxidos de nitrógeno (NO_x) son más estrictos que para los vehículos operados con Diesel. En los Estados Unidos las emisiones son medidas bajo el método dinámico FTP 75, y se expresan en [g/milla]. Para los vehículos a gasolina pueden observarse en la siguiente tabla.

Tabla 7 Estándares de emisiones EPA Tier 1, FTP 75 [g/milla]

Categoría	50000 millas / 5 años				100000 millas / 10 años			
	CO	NO _x		PM	CO	NO _x		PM
		Diesel	Gasolina			Diesel	Gasolina	
Automóviles de pasajeros	3,4	1	0,4	0,08	4,2	1,25	0,6	0,1
Vehículos con peso < 1701 kg	3,4	1	0,4	0,08	4,2	1,25	0,6	0,1
Vehículos con peso > 1701 kg	4,4	-	0,7	0,08	5,5	0,97	0,97	0,1
Vehículos con peso < 2608,2 kg	4,4	-	0,7	-	6,4	0,98	0,98	0,1
Vehículos con peso > 2608,2 kg	5,0	-	1,0	-	7,3	1,53	1,57	0,12

Fuente: (Dieselnet, 2013) (EPA, 2013)

En adición al FTP 75 en los Estados Unidos generaron el Procedimiento de Prueba Federal Suplementario (Supplemental Federal Test Procedure) SFTP que incluye unos modos de pruebas agresivo para autopista (US06) y urbano con el sistema de aire acondicionado encendido (SC03) para la medición de emisiones.

La normatividad SFTP para Tier 1 tiene un límite máximo que consiste en el resultado de la suma de unos porcentajes del FTP75, del US06 y del SC03 para la suma de las emisiones de óxidos de nitrógeno (NO_x) y de hidrocarburos no metano (NMHC).

A continuación se presenta la ecuación bajo la cual se calculan los límites de emisiones según el Procedimiento de Pruebas Federal Suplementario (SFTP).

Ecuación 1. Cálculo de los límites de emisiones según el Procedimiento de Prueba Federal Suplementario

$$SFTP = 0,35 \times FTP + 0,28 \times US06 + 0,37 \times SC03 \quad (1)$$

SFTP = Supplemental Federal Test Procedure.

FTP = Federal Test Procedure.

US06 = modo de pruebas agresivo para autopista del SFTP.

SC03 = modo de pruebas agresivo urbano con el sistema de aire acondicionado encendido del SFTP.

Para el caso del monóxido de carbono (CO) existen límites independientes para cada régimen de prueba al igual que la posibilidad de un límite basado en la sumatoria de los mismos porcentajes del FTP75, del US06 y del SC03. A continuación se presentan los límites máximos de emisiones permisibles para el SFTP.

Tabla 8 Límites máximos de emisiones SFTP [g/milla]

Categoría	50000 millas / 5 años				100000 millas / 10 años			
	NMHC+NOx	CO			NMHC+NOx	CO		
		US06	SC03	Suma		US06	SC03	Suma
Automóviles de pasajeros Vehículos con peso < 1701 kg	0,65	9,0	3,0	3,4	0,91	11,1	3,7	4,2
Automóviles con peso > 1701 kg	1,02	11,6	3,9	4,4	1,37	14,6	4,9	5,5
Automóviles con peso < 2608,2 kg	1,02	11,6	3,9	4,4	1,44	16,9	5,6	6,4
Automóviles con peso > 2608,2 kg	1,49	13,2	4,4	5,0	2,09	19,3	6,4	7,3

La normatividad Tier 2 está dirigida a vehículos no livianos que tienen pesos mayores a las 3628,7 kg (8000 lb), mientras que la legislación del Estado de California se caracteriza por ser mucho más exigente en sus límites máximos de emisión pero hace énfasis en pruebas de durabilidad de hasta 241401,6 km (150000 millas). (EPA, 2013)

1.3. Pruebas en estado estable de operación

Las pruebas dinámicas de medición de emisiones bajo ciclos de manejo se realizan con la intención de obtener en condiciones controladas la medición en [g/km] o [g/milla] de un determinado contaminante luego de cumplir con el recorrido total del ciclo. Como alternativa surgen los ciclos de prueba de estado estable que permiten tener periodos prolongados en puntos de operación del motor a velocidad constante con carga constante restándole importancia a los periodos de transición de una velocidad a otra, periodos en los cuales las emisiones y algunas variables de operación del motor no presentan tendencias claras de operación. Mundialmente son reconocidos ciclos de estado estable para probar motores de

vehículos para uso pesado y son clasificados según la cantidad de modos de estado estable de operación de cada ciclo. Sobre la aplicación de estos ciclos para pruebas de vehículos con motores que operen bajo ciclo Otto no se tiene impedimento teórico.

Los ciclos japoneses de seis o trece modos son de los que primero se tiene registro, posteriormente el ECE R49 de trece modos planteado por la Comisión Económica de las Naciones Unidas para Europa que a su vez fue reemplazado por el European Steady-state Cycle ESC; ciclo de estado estable más reciente del cual se tiene conocimiento.

El European Steady-state Cycle ESC consiste en un conjunto de trece modos de estado estable de operación que corridos consecutivamente cada uno de ellos durante un tiempo preestablecido y empleando un factor de ponderación otorgado a cada modo, se procede finalmente a agrupar los resultados obtenidos en la medición de emisiones en cada modo obteniendo los resultados y luego tratándolos para reportarlos en [g/km].

Figura 2. European Steady-state Cycle ESC

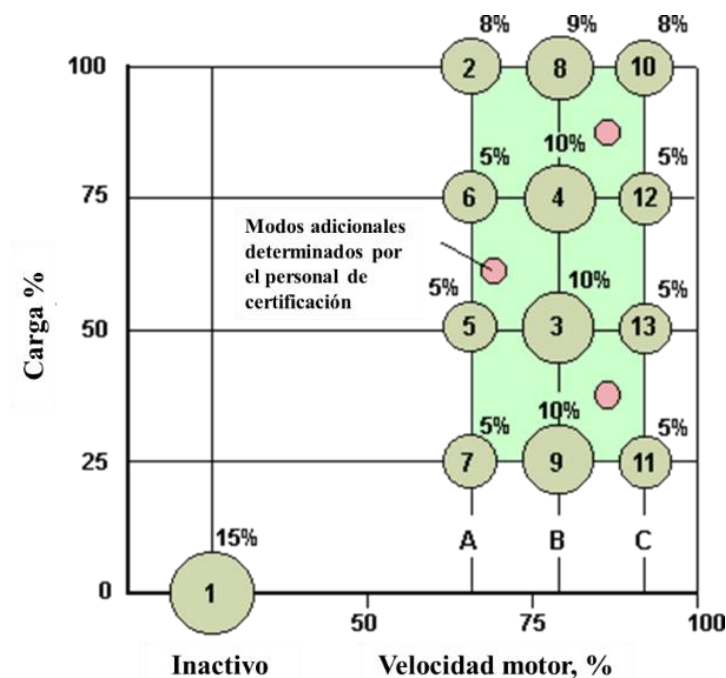


Tabla 9 Condiciones de operación European Steady-state Cycle ESC (Dieselnet, 2013)

Modo	Velocidad del motor	Carga [%]	Factor de ponderación [%]	Tiempo de duración [min]
1	Ralentí	0	15	4
2	A	100	8	2
3	B	50	10	2
4	B	75	10	2
5	A	50	5	2
6	A	75	5	2
7	A	25	5	2
8	B	100	9	2
9	B	25	10	2
10	C	100	8	2
11	C	25	5	2
12	C	75	5	2
13	C	50	5	2

Los ciclos de estado estable reconocidos mundialmente además de ser solo sugeridos para el análisis de motores de automóviles para son básicamente una prueba dinámica de emisiones y no brindan una información fuerte sobre las emisiones en cada estado estable de operación, más que el factor de ponderación con el que le dan la participación en la totalidad del ciclo.

Como objetivo de esta investigación se pretende realizar un análisis comparativo del comportamiento mecánico, energético y ambiental de un motor de vehículo liviano y un automóvil operando con mezcla E20 y con gasolina corriente, haciendo especial énfasis en los índices de emisión en [g/kWh] y [g/km].

Los ensayos se realizaron bajo estados estables de operación, lo que surge como una alternativa a las distintas pruebas y metodologías existentes y estandarizadas de medición de emisiones.

Las pruebas existentes se pueden clasificar en:

- Pruebas estáticas: Se realizan en un solo régimen de operación, normalmente en marcha mínima (Ralentí) o en velocidad de crucero (2500 RPM +/- 200 RPM).
- Pruebas dinámicas: se realizan siguiendo un ciclo de manejo y se pueden clasificar en dos más:
 - Pruebas dinámicas para vehículos: se realizan en automóviles livianos o pesados siguiendo un ciclo de conducción previamente establecido y utilizando un chasis dinamométrico.

Entre los ciclos más reconocidos mundialmente se encuentran el Federal Test Procedure - FTP75 desarrollado por la Agencia de Protección Ambiental – EPA en los Estados Unidos, el New European Driving Cycle – NEDC propuesto por la Comisión Económica Europea de las Naciones Unidas y el JAMA 10-15 desarrollado por la Asociación Japonesa de Constructores de Automóviles - JAMA.

- Pruebas dinámicas de estado estable: estos ensayos se emplean para evaluar el comportamiento de las emisiones en vehículos de trabajo pesado; las pruebas se realizan a los motores en dinamómetro de banco llevándolos a distintos modos estables de operación. Al final del paso por todos los modos de operación del ciclo, se realiza el cálculo de los índices de emisión para todo el ciclo empleando un factor de ponderación para cada modo.

Entre los ciclos de estado estable más utilizados se encuentra el Ciclo Estacionario Europeo – ESC desarrollado por la Comisión Económica Europea de las Naciones Unidas. (Dieselnet, 2013) (Minambiente, 2008)

Para las pruebas dinámicas se siguen ciclos preestablecidos al final de los cuales se calculan los índices de emisión en [g/km], [g/milla] o [g/kWh], teniendo en cuenta los valores promedio del flujo volumétrico de las emisiones, la concentración volumétrica de los gases presentes en las emisiones contaminantes, la velocidad media del ciclo y en el caso de las

pruebas dinámicas de estado estable unos factores de ponderación otorgados a cada modo de operación.

Como componente innovador en esta investigación el Grupo de Investigación en Gestión Energética – GENERGÉTICA plantea una forma para determinar los índices de emisión para modos específicos de operación, a partir de los resultados obtenidos en “pruebas estáticas de estado estable”.

Se propone realizar pruebas en 15 puntos de estado estable identificados por la velocidad angular del motor y el porcentaje de carga; controlados en este caso con el tacómetro y la señal de apertura de la mariposa del acelerador.

Los 15 estados estables de operación fueron seleccionados ubicándolos en cuatro regímenes de velocidad angular del motor (1500, 2500, 3500 y 4500 RPM), así como cuatro puntos de carga (25%, 50%, 75% y 100%) y fueron seleccionados por reflejar una gran variedad de modos posibles de operación del motor.

Esta propuesta surge como alternativa a las pruebas dinámicas de estado estable donde los resultados son la ponderación de una serie de valores en los cuales la variación en las emisiones y en las prestaciones de los motores durante los periodos de transición de un modo de operación a otro, generan ruidos en los resultados.

Evaluar en modos específicos de operación se plantea como un recurso para futuros análisis sobre los estados estables bajo los cuales se presentan mejor comportamiento las distintas variables medidas en los motores y como una herramienta útil en procesos de programación de computadoras controladoras de la inyección de combustible así como la puesta a punto de los motores de combustión interna.

En esta oportunidad no se realizaron mediciones en más puntos de estado estable por dificultades para la estabilización del motor en condiciones intermedias de las previamente seleccionadas, al igual que por limitaciones de tiempo y presupuesto.

En este proyecto de investigación se realizaron pruebas que permitieron determinar los índices de emisión en [g/kWh] y [g/km] de un motor GM Z16SE y un vehículo Chevrolet Sail 1400 cc funcionando en diferentes estados estables de operación.

Como objetivo principal de este trabajo se plantea realizar un análisis comparativo del comportamiento mecánico, energético y ambiental de un motor de vehículo liviano operando con mezcla E20 y con gasolina magna, haciendo especial énfasis en los índices de emisión en [g/kWh] y [g/km]; así como una serie de objetivos específicos que se enlistan a continuación:

- Realizar un seguimiento al comportamiento de variables de operación del motor como revoluciones por minuto, porcentaje de posición del acelerador, relación aire-combustible y sensor de presión de admisión; durante pruebas de laboratorio con un vehículo liviano operando en régimen de estado estable con mezcla etanol-gasolina E20 y con gasolina magna.
- Medir las emisiones contaminantes en régimen de estado estable operando con mezcla etanol-gasolina E20 y gasolina magna, generadas por un vehículo liviano durante las pruebas de laboratorio de NO_x, CO, CO₂, HC en [g/kWh].
- Comparar entre los resultados de las pruebas experimentales y los valores esperados tras el análisis teórico de la combustión.

En este documento se encontrará información relacionada con el desarrollo de este estudio, la metodología empleada, las pruebas realizadas, al igual que los resultados obtenidos; todo esto discriminado en los capítulos que se describen a continuación:

- 2. Revisión bibliográfica:

Durante esta revisión se destaca información acerca de distintos estudios que anteceden a este, sobre todo en temas de pruebas con biocombustibles con flotas cautivas, proyectos en los que se realizaron pruebas de larga duración, investigaciones desarrolladas con mezclas de etanol – gasolina con motores en bancos de prueba así como los antecedentes que se encuentran reportados en las bases de dato consultadas sobre estudios de pruebas de motores en estado estable de operación.

- 3. Metodología experimental:

Este estudio fue realizado conjuntamente entre el Grupo de Investigación en Gestión Energética de la UTP en Colombia y el Centro de Investigación en Mecatrónica Automotriz CIMA del ITESM en México; en cada uno de los sitios de prueba se contó con equipamiento y condiciones propias de cada lugar, al igual que distintos motores de prueba, por lo anterior en este capítulo se realiza una descripción de las condiciones y metodología de prueba, así como los cálculos realizados y software empleados para determinar los índices de emisión en [g/kWh] y [g/km].

- 4. Resultados fase experimental:

Aquí se muestra gráficamente los resultados de las pruebas realizadas en un motor GM Z16SE en la ciudad de Toluca, así como las realizadas con un vehículo Chevrolet Sail en la ciudad de Pereira, todo esto con gasolina y mezcla etanol-gasolina bajo 15 estados estables de operación. Además de las gráficas en este informe se realiza un análisis comparativo entre los resultados de las variables de desempeño así como las emisiones de CO₂, CO, HC, NO_x y O₂ producto de la operación con gasolina, frente a los obtenidos con la mezcla etanol-gasolina E20.

- 5. Conclusiones y recomendaciones:

A partir de los resultados obtenidos en las diferentes pruebas realizadas y luego de la comparación entre los índices de emisión de los motores operando con gasolina al igual que con la mezcla de etanol-gasolina E20, se realizó un análisis que permitió concluir acerca de las diferencias en las emisiones y prestaciones de los motores probados con ambos combustibles en los dos lugares. Todo esto se puede ver en el último capítulo de cierre de este informe.

A continuación se presenta el informe del proyecto de investigación denominado: Determinación de las emisiones en regímenes de estado estable de un vehículo liviano operando con mezcla de etanol y gasolina, E20.

2. Revisión bibliográfica

Los estudios con mezclas de etanol-gasolina, así como el impacto sobre las prestaciones y las emisiones de los motores de combustión interna se clasifican en tres tipos que se describen a continuación:

2.1. Estudios con flotas cautivas, pruebas de larga duración

En este tipo de investigaciones sobresale un estudio de durabilidad realizado por la Universidad Estatal de Minnesota en el cual operaron cuarenta pares de vehículos con E0 y E20 durante un año normal de operación por todo el Estado. En este estudio indicaron no encontrar diferencias estadísticamente significativas en la sensación de manejo o en el desempeño de los cuarenta pares de vehículos operando con ambos combustibles. (Kittelson D., 2008)

Otro estudio referenciado internacionalmente pertenece al Laboratorio Nacional de Energía Renovable – NREL y al Laboratorio Nacional de Oak Ridge - ORNL de los Estados Unidos en el cual probaron 16 pares de automóviles durante un año con E0 y E20 determinando variaciones en el consumo de combustible, las emisiones y las prestaciones de los vehículos, concluyendo que todos los 16 vehículos experimentaron una disminución en la economía de combustible al utilizar E20 cercana al 7,7% con respecto al E0. También luego de realizar algunas pruebas con E30 concluyeron que la reducción en la economía de combustible tiene un comportamiento lineal en relación con el porcentaje de etanol.

En cuanto a las emisiones en este estudio concluyeron que los óxidos de nitrógeno (NO_x) y los gases orgánicos no metano (NMOG) no registraron variaciones significativas con el cambio de porcentaje de etanol ensayado. Reportaron disminución del CO y los HC con el aumento del porcentaje de etanol, mientras que las emisiones de etanol, acetaldehídos y formaldehídos se incrementaron. (NREL., 2012)

Este estudio contó con un análisis de la variación de la temperatura de los gases producto de la combustión al pasar por los catalizadores de los vehículos de prueba, reportando que a condiciones de baja carga no se registraron cambios en la variación de temperatura al

aumentar la concentración del etanol en el combustible, pero en los otros rangos de operación de los motores este estudio reportó el hallazgo de dos escenarios:

- Nueve de los 16 vehículos de prueba realizaron un ajuste desde la computadora para mantener la mezcla estequiométrica pese a la inclusión del 20% de etanol logrando una mínima variación en las temperaturas alrededor del catalizador.
- Siete de los 16 vehículos ensayados registraron un enriquecimiento de la mezcla para la combustión con E20 aumentando la temperatura a la salida del catalizador entre 29°C y 35°C con respecto a las emisiones de E0 medidas en el mismo punto.

Con respecto a la operatividad de los automóviles ensayados variando el combustible de prueba no se registraron inconvenientes relacionados con el aumento del porcentaje del etanol. (NREL., 2012)

El grupo de investigación en Sistemas Térmicos y Potencia Mecánica de la Universidad Tecnológica de Pereira realizó pruebas con cuatro vehículos, dos con tecnología carburada y dos de inyección electrónica operando con mezclas etanol-gasolina E10 y E20. Estos vehículos recorrieron 100000 km con cada uno y al finalizar este estudio concluyeron que:

- La potencia máxima obtenida en los dos vehículos carburados y los dos inyectados con combustible E20, respecto a la obtenida con combustible E10, es mayor entre el 1% y el 3%.
- El par de torsión máximo en tres de los cuatro vehículos de prueba aumentó entre 0,3% y el 2,2% con el uso del combustible E20, con respecto al uso del E10. El otro vehículo, alimentado con carburador, presentó una disminución en el par de torsión del 2,8%. En todos los casos la diferencia está dentro de la variabilidad de la prueba.
- En los vehículos de tecnología de inyección electrónica de combustible la mezcla de combustible E20 presenta hasta un 8% de mayor consumo específico en regímenes bajos y medios (menores a 5500 RPM), con respecto al registrado con combustible E10. Para regímenes altos el fenómeno es inverso y presenta una disminución del 1,5% a 6000 RPM.
- En los vehículos inyectados los resultados obtenidos para las emisiones de gases de escape tales como: CO₂, CO, HC, O₂ y NO_x, usando mezcla E10 respecto a los resultados

obtenidos con mezcla E20 no presentaron diferencias estadísticamente significativas. (Rios L.C, 2012)

2.2. Estudios con motores en bancos de pruebas

De los muchos estudios realizados con mezclas de etanol-gasolina en motores de combustión interna analizados en celdas de pruebas de motores, sobresale el realizado por el Laboratorio Nacional de Energía Renovable - NREL y el Laboratorio Nacional Oak Ridge - ORNL de los Estados Unidos donde probaron las prestaciones y emisiones de 28 motores operando bajo ciclos dinámicos de prueba y concluyendo que con mayor contenido de etanol, las temperaturas de los componentes de escape, culata y cilindros en general aumentaron.

El mayor aumento de temperatura se registró en los sistemas de escape de la siguiente forma:

- De E0 a E15, de 10 °C a 50 °C.
- De E0 a E20, de 20 °C a 70 °C.

Con respecto a las pruebas de durabilidad y compatibilidad de los materiales con las mezclas de etanol-gasolina ensayadas en este proyecto, no se registraron incompatibilidades de los componentes de los motores con las mezclas probadas. (NREL-ORNL., 2009)

2.3. Estudios pruebas en estado estable de operación

Como antecedente más relevante en este tipo de estudio se puede referenciar “*Prestaciones y emisiones contaminantes de un motor de encendido por chispa utilizando mezcla de etanol y gasolina*” un estudio presentado por investigadores taiwaneses en el año 2001 en el cual probaron un motor Nissan con E0, E5, E10, E20 y E30 en cinco velocidades del motor y seis posiciones del acelerador.

En este estudio los autores además de concluir que por la presencia de etanol como aditivo oxigenante permite una mejor combustión disminuyendo el CO y los HC en las emisiones, analizaron la incidencia de la velocidad del motor sobre la variación de las emisiones de CO y HC. Concluyendo que para el caso de 4000 y 3000 RPM es similar la tendencia de la variación para los distintos combustibles de prueba, pero la concentración de CO y HC es

mayor para 4000 RPM dado el menor tiempo disponible para la reacción de combustión por la mayor velocidad del motor.

La variación de la concentración de CO_2 es contraria a la de CO . Cuando el motor va más lento, el proceso de combustión es más completo y la concentración de las emisiones de CO_2 se hace mayor. Para el caso de los NO_x ratificaron la influencia de las altas temperaturas en la cámara de combustión sobre la aparición de estos y esperan que en los puntos de combustión más cercanos a $\lambda=1$ se obtengan mayores concentraciones de NO_x debido a la mejor combustión y por ende mayor adición de calor en el ciclo. (Wei-Dong Hsieha, 2002) En este mismo estudio hicieron referencia a las conclusiones de otros autores como (AA Abdel-Rahman, 1997) quienes probaron 10%, 20%, 30% y 40% de etanol de los combustibles en un motor de relación de compresión variable encontrando que el aumento de contenido de etanol aumenta el índice de octano, pero disminuye el poder calorífico. Bajo diversas relaciones de compresión de motor, concluyendo que la mezcla óptima es el E10. (NREL-ORNL., 2009)

3. Metodología experimental

Este estudio se desarrolló conjuntamente entre el Grupo de Investigación en Gestión Energética - GENERGÉTICA perteneciente a la Universidad Tecnológica de Pereira y el Centro de Investigación en Mecatrónica Automotriz – CIMA del Instituto Tecnológico de Estudios Superiores de Monterrey campus Toluca, logrando realizar pruebas bajo dos condiciones distintas, generándose una herramienta de comparación enriquecedora por el poder contar inicialmente con dos sitios a diferentes alturas sobre el nivel del mar ofreciéndole a esta investigación condiciones de prueba a 2660 m.s.n.m. en Toluca comparables también de ciudades ubicadas a gran altura como Bogotá, Quito o México; al igual que unas pruebas a 1410 m.s.n.m. en Pereira representativas de las condiciones de operación de los vehículos que funcionan en centros poblados ubicados en alturas entre los 1000 y los 2000 m.s.n.m. como ocurre en gran parte del territorio colombiano.

En cada una de las localidades en las cuales se realizaron pruebas, se dispuso de los equipos necesarios para monitorear las diferentes variables para la medición de las emisiones y posterior cálculo de los índices de emisión en [g/km] o [g/kWh].

Los montajes experimentales difirieron dependiendo del laboratorio de pruebas debido al tipo de equipos con los que se cuentan en cada uno de ellos. A continuación se presentan dos esquemas sobre el montaje experimental en cada uno de los laboratorios de prueba en los cuales se ejecutaron las mediciones de esta investigación.

Figura 3. Montaje experimental LPDA UTP - Pereira

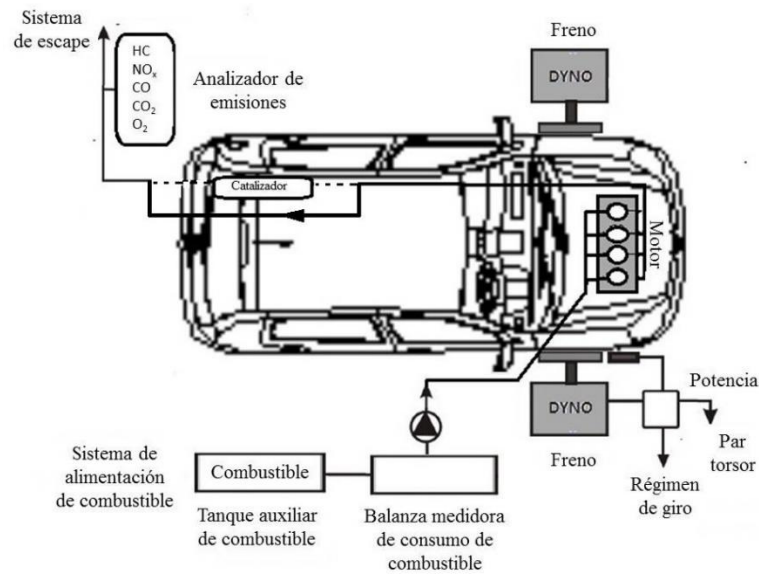
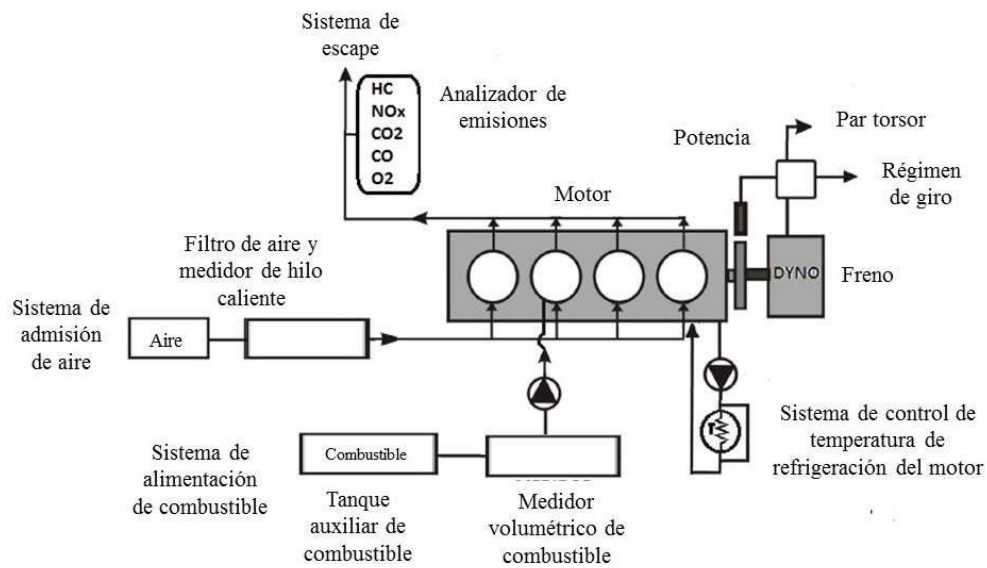


Figura 4. Montaje experimental CIMA ITESM - Toluca



Más adelante se presentarán las características de cada uno de los componentes empleados en los montajes experimentales en cada localidad de prueba, mientras tanto a continuación

se enlistan las variables monitoreadas durante las pruebas y que fueron necesarias para el posterior cálculo de los índices de emisión objeto de este estudio.

3.1. Variables a seguir

Para el cálculo de los índices de emisión en [g/km] y [g/kWh] en condiciones de estado estable de operación fue necesario realizar mediciones de las siguientes variables durante las pruebas de estado estable de operación:

- Potencia en [HP] o [kW]
- Velocidad angular del motor en [RPM]
- Velocidad lineal del vehículo en [km/h]
- Tiempo de la prueba en cada estado estable de operación en [s]
- Consumo de combustible durante la prueba en [g]
- Flujo másico de combustible en [g/s]
- Relación aire combustible [AFR]
- Exceso de aire [λ]

3.2. Matriz de pruebas

En este trabajo se busca determinar los índices de emisión en varios estados estables de funcionamiento del motor cubriendo gran parte de su rango de operación; este rango está definido por la variación de la velocidad de giro y de la carga de operación a la cual se someta el motor.

Lo anterior difiere de lo que normalmente se encuentra en la literatura que hace referencia a los índices de emisión, dado que solo son reportados para el motor operando a plena carga o en un solo estado estable de operación; de este modo en este estudio se presenta una mirada detallada a más puntos dentro del rango de operación del motor, surgiendo esta metodología como una alternativa para caracterizar el comportamiento de las emisiones vehiculares.

Con el fin de cubrir varios puntos de estado estable de operación dentro del rango de funcionamiento del motor de combustión interna se determinó realizar pruebas en cuatro

regímenes de revolución medidos con el tacómetro del motor así como en cuatro puntos de carga del motor estimados según la posición del acelerador, que en esta estudio fue controlada a partir de las señal del sensor TPS (Throttle Position Sensor) o en español Sensor de Posicionamiento de la Mariposa de Aceleración.

Dadas las características de los motores ensayados, se encontró con la imposibilidad de realizar pruebas en uno de los 16 puntos estables estipulados dentro de la matriz de diseño, este punto de operación es a 4500 RPM y 25% de carga debido a que el motor no alcanza esta velocidad con esa leve apertura de la mariposa del acelerador.

Tabla 10 Matriz de pruebas

TPS \ RPM	RPM			
	1500	2500	3500	4500
25%	X	X	x	-----
50%	x	X	x	x
75%	x	X	x	x
100%	x	X	x	x

La señal del TPS se monitoreó durante las pruebas con la ayuda de un equipo ELM 327, dispositivo bluetooth que conectado al puerto OBDII del vehículo permite conocer el comportamiento de la señal que reportan diferentes sensores del automotor.

3.3. Pruebas en el LPDA – UTP (Pereira, Colombia)

En el Laboratorio de pruebas dinámicas automotrices – LPDA de la UTP se realizaron las mediciones de emisiones, potencia, velocidad del motor así como el consumo específico de combustible por técnica gravimétrica para posteriormente calcular los índices de emisión en [g/kWh] y [g/km].

El LPDA se encuentra ubicado en la ciudad de Pereira a 1411 m.s.n.m. y la temperatura media durante la realización de las pruebas reportada por un termómetro acoplado al dinamómetro fue de 21°C.

3.3.1. Vehículo probado en el LPDA - UTP (Pereira, Colombia)

Para la realización de las pruebas en la ciudad de Pereira se empleó un vehículo marca Chevrolet Sail 1,4 L modelo 2012 que al momento de los ensayos contaba con 7300 km.

Figura 5. Vehículo de pruebas Pereira - Chevrolet Sail 1,4L



A continuación se especifican las características técnicas del motor que utiliza el vehículo de pruebas ensayado en el LPDA en Pereira.

Tabla 11 Ficha técnica Chevrolet Sail (General Motors, 2014)

Tipo de motor	1,4 Litros DOHC
Desplazamiento [cm³]	1398
Orientación	Transversal
Relación de compresión	10,2
Diámetro de cilindro / Carrera	79,8 mm / 81,8 mm
Distribución	4 válvulas por cilindro / 2 árboles de levas en la culata

Sistema de combustible	Inyección electrónica indirecta
Tipo de combustible	Gasolina
Potencia máxima	76 kW / 6000 RPM
Par de torsión	130 Nm / 4200 RPM

Diferentes características de los equipos utilizados para la realización de las pruebas en el LPDA en la ciudad de Pereira se pueden encontrar en el Anexo 1.

3.4. Pruebas CIMA - ITESM (Toluca, México)

En el marco de la realización de esta investigación se realizaron pruebas en el Centro de Investigación en Mecatrónica Automotriz - CIMA adscrito al Instituto Tecnológico de Estudios Superiores de Monterrey – ITESM. A diferencia de las pruebas realizadas en la UTP estas se realizaron en un motor de combustión en banco de pruebas.

El laboratorio de pruebas el CIMA se encuentra ubicado en la ciudad de Toluca de Lerdo en el Estado de México a una altura sobre el nivel del mar de 2660 m.s.n.m. y durante el periodo de pruebas se contó con una temperatura promedio de 17°C.

3.4.1. Motor de probado en el CIMA - ITESM (Toluca, México)

Por disponibilidad en la celda de pruebas de motores en el CIMA se encuentra instalado para pruebas un motor a combustión interna GM Z16SE que convencionalmente es utilizado en los vehículos livianos Chevy 1600cc conocidos en Colombia como Chevrolet Corsa. El motor fue debidamente instrumentado y controlado con su computadora original.

Figura 6. Motor Chevy probado en el CIMA ITESM – Toluca



Las características del motor ensayado en la celda de pruebas de motores del CIMA no son iguales a las del motor del vehículo de pruebas pero ambos son comúnmente utilizados en vehículos livianos tanto en México como en Colombia y se encontraron disponibles en los laboratorios para los respectivos ensayos.

Tabla 12 Ficha técnica motores probado en el CIMA ITESM - Toluca (General Motors, 2014)

Tipo	GM Z16SE
Desplazamiento [cm³]	1597
Orientación	Longitudinal
Relación de compresión	9,4
Distribución	2 válvulas por cilindro / 1 árbol de levas en la culata
Sistema de combustible	Inyección electrónica secuencial multipunto

Tipo de combustible	Gasolina
Potencia máxima	74,5 kW / 5600 RPM
Par de torsión	135,6 Nm / 3200 RPM

Una descripción detallada de los equipos empleados durante las pruebas en el CIMA, al igual que distintas gráficas sobre algunos procesos de comparación y calibración realizados a éstos se puede encontrar en el Anexo 2 del presente documento.

3.5. Cálculo de los índices de emisión

En el desarrollo de este trabajo y como estrategia para tener un punto de comparación entre lo teórico y lo práctico se adoptaron algunas metodologías que se explican a continuación para el cálculo de los índices de emisión en [g/km] y [g/kWh].

3.5.1. Cálculo teórico de los índices de emisión

Esta fase se subdividió en tres partes:

- Recopilación de información necesaria producto de experiencias anteriores.
- Cálculo de las emisiones en concentración volumétrica y los valores de las prestaciones del motor bajo el modelo CIMA.
- Cálculo de los índices de emisión en [g/km] y [g/kWh] apoyados en metodología generada por el grupo de investigación GENERGÉTICA de la UTP.

La primera parte de recopilación de la información necesaria producto de experiencias anteriores aportó datos importantes para el cálculo teórico de los índices de emisión como:

- Presión de admisión para cada estado estable de operación del motor.
- la cámara de combustión y relación de compresión del motor de pruebas.
- Condiciones ambientales (Presión y Temperatura).
- Poder calorífico inferior de los combustibles de prueba.
- Relación aire combustible estequiométrica para el combustible de pruebas.
- λ medido para cada estado estable de operación. Probados

Con los datos anteriores se empleó un modelo simulador de combustión generado por el grupo de investigadores del CIMA; modelo que tiene por objetivo predecir el desempeño mecánico representado en el par de torsión y la potencia, así como el energético con el consumo específico de combustible - (SFC) y el ambiental del motor de combustión interna operando con algún combustible.

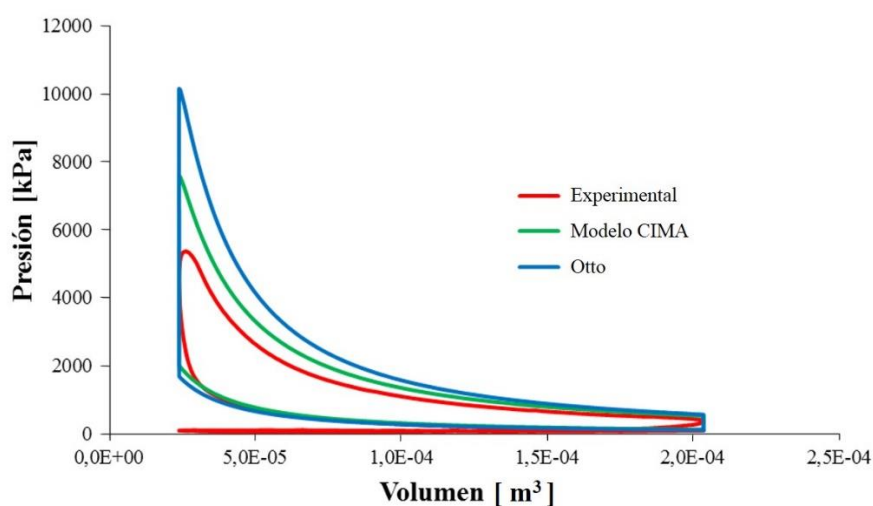
Este modelo surge como una alternativa a los supuestos comunes del ciclo Otto que normalmente se emplean para realizar análisis teórico de la combustión. Las principales diferencias ente este modelo y el Otto teórico tradicional se pueden ver en la siguiente tabla.

Tabla 13 Comparativo cálculos de propiedades en modelo de combustión CIMA y modelo ciclo Otto tradicional

Estado	Modelo Otto		Modelo CIMA	
	T	P	T	P
1	$T_1 = T_0 + 40^\circ\text{C}$	$P_1 = P_0$	$T_1 = T_0 + 40^\circ\text{C}$	$P_1 = P_0$
2	$T_2 = T_1 r_c^{k-1}$	$P_2 = P_1 r_c \left(\frac{T_2}{T_1} \right)$	$n_{is} = \frac{\partial w_{i(1-2)}}{\partial w_{r(1-2)}}$ $T_2^r @ u_2^r$	$P_2 = P_1 r_c \left(\frac{T_2^r}{T_1} \right)$
3	$T_3 = T_2 + \frac{m_f LHV n_c}{m C_v}$	$P_3 = P_2 \left(\frac{T_3}{T_2} \right)$	$U_3 - U_2 = 0$	$P_3 = P_2 \left(\frac{T_3}{T_2} \right)$
4	$T_4 = \frac{T_3}{r_c^{k-1}}$	$P_4 = \frac{P_3}{r_c} \left(\frac{T_4}{T_3} \right)$	$n_{is} = \frac{\partial w_{r(3-4)}}{\partial w_{i(3-4)}}$ $T_4^r @ u_4^r$	$P_4 = \frac{P_3}{r_c} \left(\frac{T_4^r}{T_3} \right)$
7	$T_7 = \frac{T_4}{r_c^{k-1}}$	$P_7 = P_0$	$n_{is} = \frac{\partial w_{r(4-7)}}{\partial w_{i(4-7)}}$ $T_7^r @ u_7^r$	$P_7 = P_0$

Apoyados en los cálculos de los modelos teóricos del ciclo Otto y la adaptación desarrollada por el CIMA, comparándolos con resultados experimentales adquiridos con la ayuda de un sensor de presión de cámara de combustión tipo bujía se obtuvo la siguiente gráfica P-vs-V del ciclo Otto en la cual se puede apreciar el acercamiento que tiene el ciclo que representa al modelo CIMA al ciclo graficado con los datos obtenidos experimentalmente.

Figura 7. Diagrama P-V comparativo ciclo Otto Teórico y Modelo CIMA

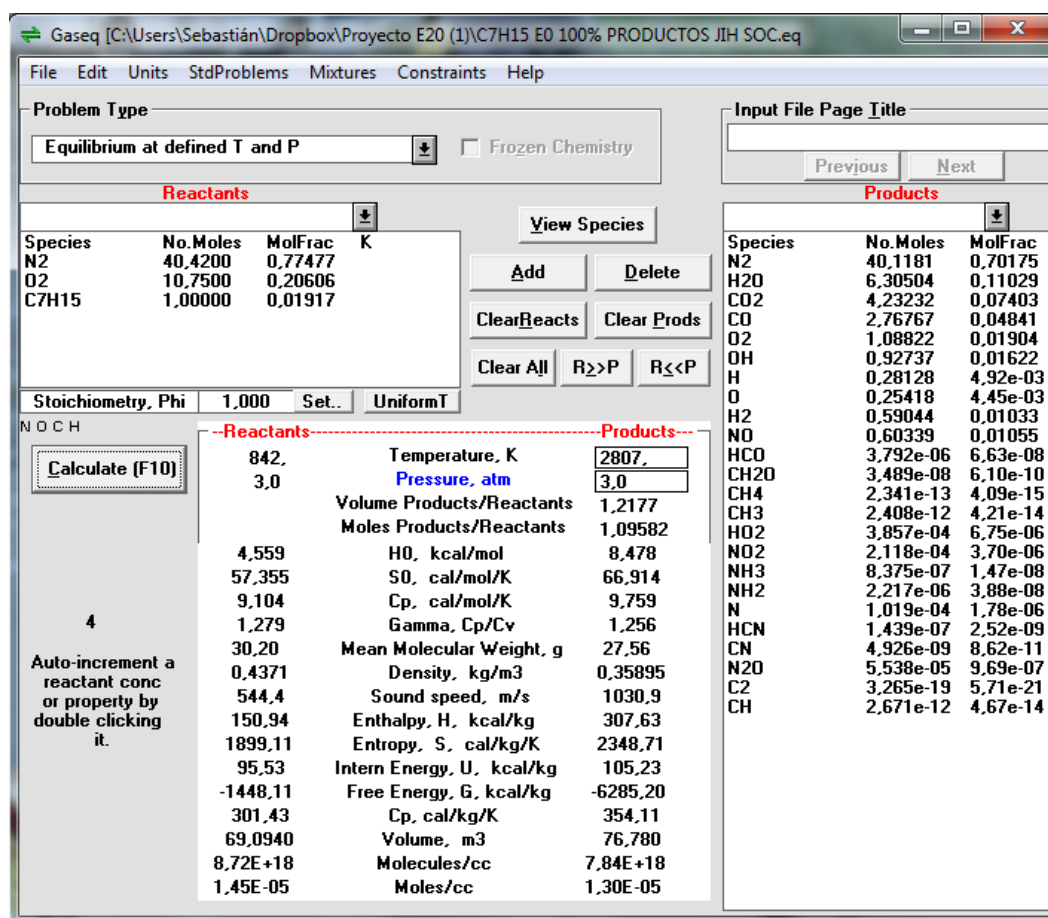


La solución de las ecuaciones de los cálculos de las prestaciones del motor se realizan bajo un programa elaborado en Engineering Equation Solver – EES, mientras que la temperatura de combustión (T_3) al igual que la concentración volumétrica de los gases producto de la combustión se obtienen utilizando un programa computacional de equilibrio químico llamado GASEQ, en el cual se ingresan las fracciones molares de los reactivos de la combustión y las condiciones iniciales de la combustión para obtener T_3 .

Posteriormente se ingresan las condiciones ambientales a las que salen los gases producto de la combustión y el programa GASEQ calcula las fracciones volumétricas de las emisiones; de ese reporte se obtiene el dato teórico de la concentración de CO, CO₂, O₂, NO para el caso de los NO_x y CH₄ en representación de los HC. Los resultados teóricos reportados en este estudio corresponden a las emisiones calculadas con GASEQ luego de extraer el agua del balance de estas emisiones, obteniendo unos resultados con base seca, tal cual como son

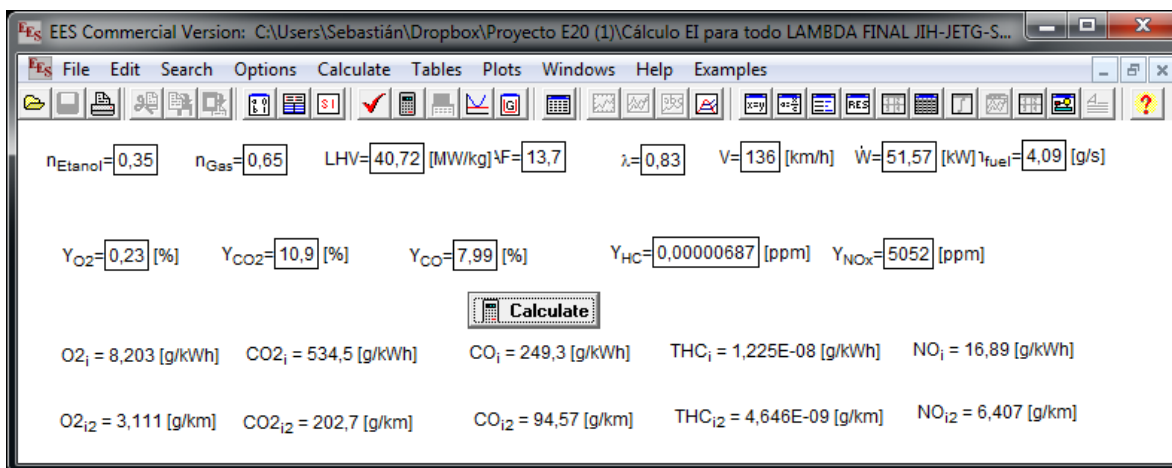
reportados por los analizadores de gases. A continuación se presenta una imagen donde se visualiza el entorno del software GASEQ.

Figura 8. Ambiente software GASEQ



Luego de la obtención de las concentraciones volumétricas de los gases de escape con GASEQ al igual que el flujo másico de combustible, la potencia y demás variables necesarias con el programa diseñado en EES, se procede a calcular los índices de emisión a partir de balance de materia con una herramienta diseñada en EES por el Grupo de Investigación en Gestión Energética – GENERGÉTICA de la UTP con el apoyo del Dr. José Ignacio Huertas.

Figura 9. Ambiente software EES programa cálculo de los índices de emisión



3.5.2. Cálculo de los índices de emisión prácticos

En esta parte de este proyecto se procedió de igual forma que con el cálculo de los índices de emisión teóricos con la herramienta en EES Diseñada por el grupo de investigación GENERGÉTICA, pero en esta oportunidad a partir de los datos de emisiones, flujo de combustible y prestaciones de los vehículos medidos en los laboratorios de prueba.

4. Resultados fase experimental

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos en cada una de las condiciones de prueba tanto en Pereira como en Toluca en las pruebas de estado estable para determinar los índices de emisión en [g/kWh] y [g/km].

Para determinar los valores promedio de cada una de las mediciones de emisiones, consumo de combustible y desempeño en los quince estados estables de operación en los cuales se probaron el motor Chevy en Toluca y el vehículo Chevrolet Sail en Pereira, se realizaron 6 repeticiones. A pesar de que este número de repeticiones arroja un tamaño de muestra relativamente pequeño con respecto a lo esperado por la teoría estadística de la distribución normal, se realizaron esta cantidad de repeticiones por razones de tiempo y costo que limitaron este estudio.

Asumiendo un comportamiento normal de la distribución de los resultados pero teniendo en cuenta lo reducido del tamaño de la muestra, se realizó el análisis estadístico de los resultados por medio de la distribución T de Student con un intervalo de confianza del 95% para probar las hipótesis de esta investigación. Este análisis estadístico exige al menos seis datos que permiten tener cinco grados de libertad ($n-1$) y plantear así el nivel de intervalo de confianza esperado.

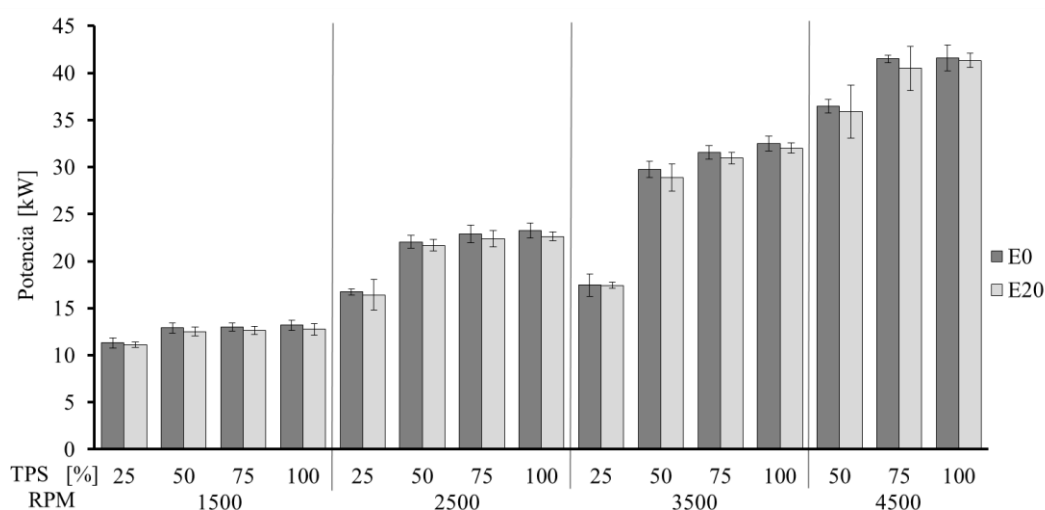
4.1. Resultados pruebas motor GM Z16SE CIMA-ITESM (Toluca, México)

En el Centro de Investigación en Mecatrónica Automotriz del ITESM campus Toluca se realizaron pruebas en un motor GM Z16SE acoplado a un chasis dinamométrico instalado en un banco de pruebas; para este trabajo se realizaron pruebas en quince estados estables de operación con dos combustibles de prueba: gasolina corriente y mezcla etanol-gasolina E20.

4.1.1. Potencia pruebas CIMA-ITESM (Toluca, México)

La potencia como variable clave para el cálculo de los índices de emisión en [g/kWh] fue medida con la ayuda del dinamómetro Super Flow F-902. A continuación se presentan los resultados comparativos del promedio de las pruebas realizadas con los dos combustibles en cada uno de los quince estados estables de operación en la ciudad de Toluca.

Figura 10. Potencia pruebas CIMA ITESM



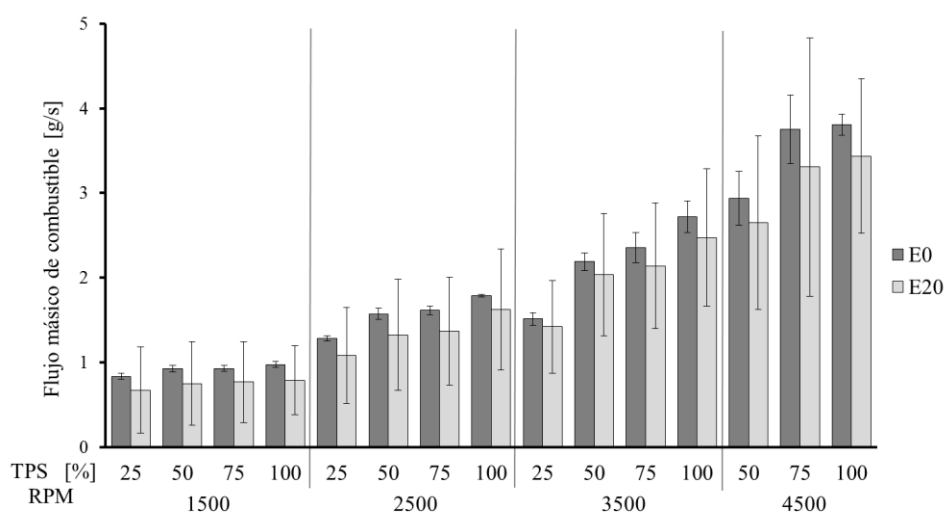
De la gráfica anterior se aprecia en promedio una disminución del 1,9% en la potencia con E20 frente a la gasolina sin etanol. En ninguno de los quince estados estables de operación probados se registró aumento de la potencia con E0 respecto al motor empleando E0.

Con el aumento de la velocidad de giro del motor se presenta un incremento en la potencia tanto con E20 como con E0, pero se visualizó una mayor variación en la potencia entre E20 y E0 a bajos regímenes de giro. Para el motor probado en Toluca la máxima disminución en la potencia con E0 se presentó a 1500 RPM y 100% de carga siendo del 3,17%.

4.1.2. Flujo másico de combustible pruebas CIMA-ITESM (Toluca, México)

Luego del desarrollo de las pruebas con gasolina corriente y mezcla etanol-gasolina E20 en los quince estados estables de operación con el motor GM Z16SE en el CIMA-ITESM Toluca se registró en promedio una disminución en el flujo másico de combustible del 12,89% con E20 respecto a E0.

Figura 11. Flujo másico de combustible pruebas CIMA ITESM



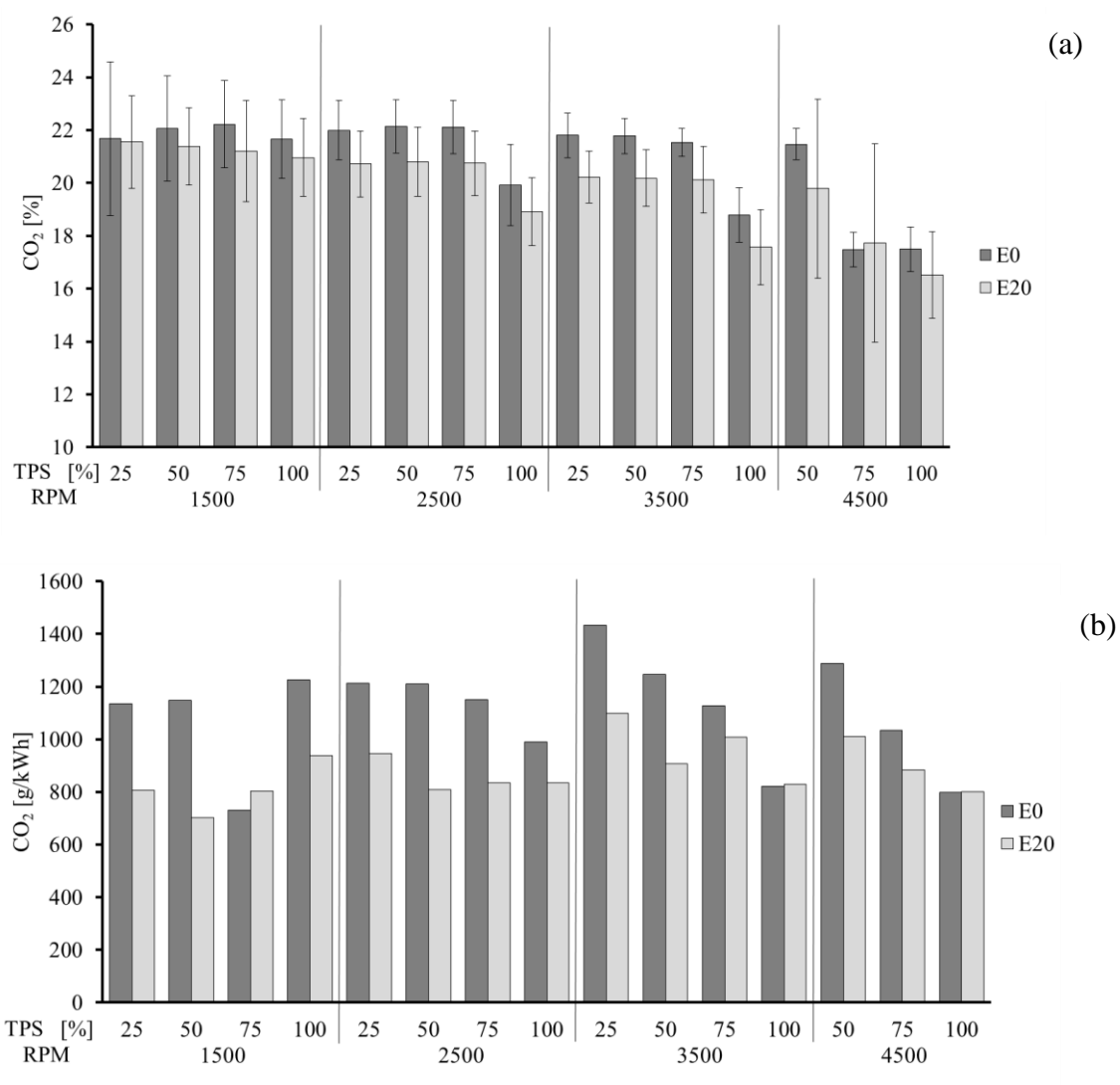
Por los requerimientos energéticos del motor es de esperarse que la relación que tiene el flujo másico de combustible con la velocidad de giro y la carga sea directamente proporcional. El motor del GM Z16SE 1600 cm³ ensayado en Toluca presentó siempre con E20 una disminución en el flujo másico de combustible; registrando a 1500 RPM y 25% de carga la mayor disminución, siendo del 19,63%.

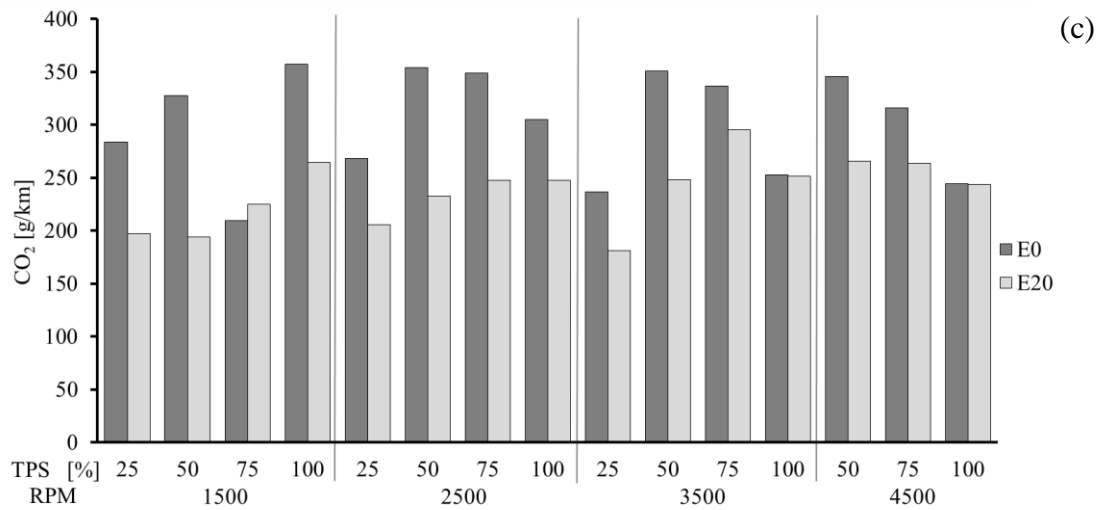
4.1.3. Dióxido de Carbono - CO₂ pruebas CIMA-ITESM (Toluca, México)

Con el motor GM Z16SE ensayado en Toluca se registró una disminución promedio con E20 respecto a E0 en la concentración volumétrica de CO₂ en las emisiones, así como en los índices de emisión en [g/kWh] y [g/km] del 4,94%, 18,38% y 20,05% respectivamente, visualizándose la mayor disminución en los índices de emisión a 1500 RPM y 50% de carga

entre todos los quince puntos de estado estable probados con el motor en Toluca, con una variación cercana al 40% para ambos índices [g/kWh] y [g/km] de E20 a E0.

Figura 12. CO₂ pruebas CIMA – ITESM, (a) [%], (b) [g/kWh], (c) [g/km]



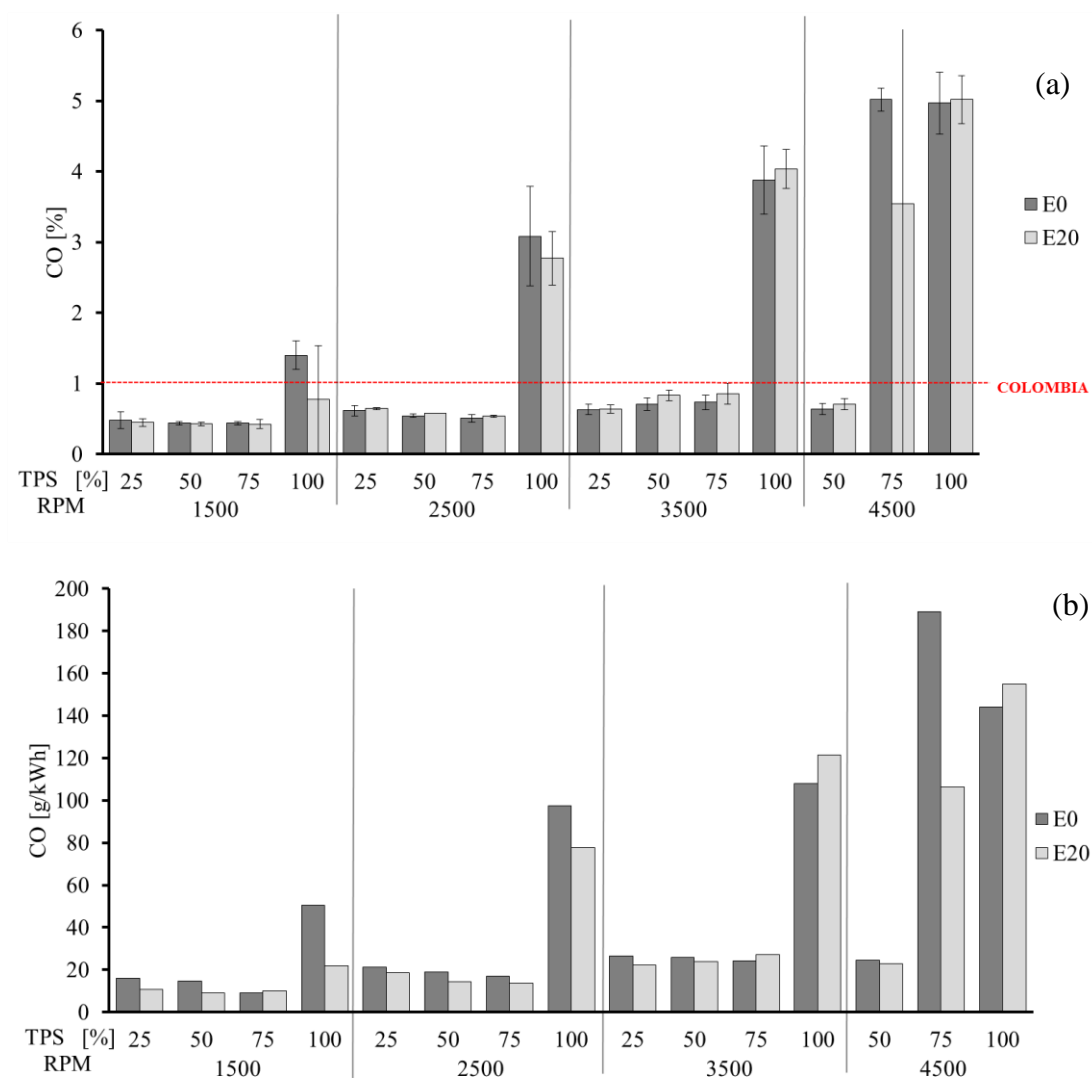


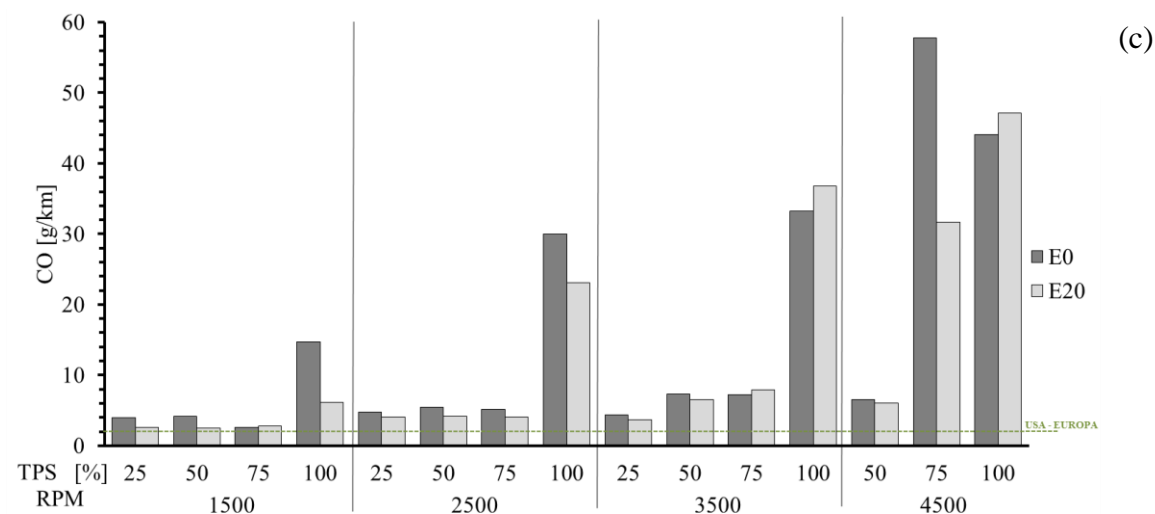
Para el motor Chevy probado en Toluca, el estado estable de operación en el cual se registró la menor variación en los índices de emisión de CO₂ con E20 respecto a E0 fue 4500 RPM y plena carga.

4.1.4. Monóxido de Carbono – CO pruebas CIMA-ITESM (Toluca, México)

Con el motor Chevy 1600 cm³ ensayado en Toluca se registró una tendencia al aumento del CO con E20 respecto en 1,8%, 15,69% y 17,63% para la concentración volumétrica así como los índices de emisión en [g/kWh] y [g/km] respectivamente.

Figura 13. CO pruebas CIMA –ITESM, (a) [%], (b) [g/kWh], (c) [g/km]



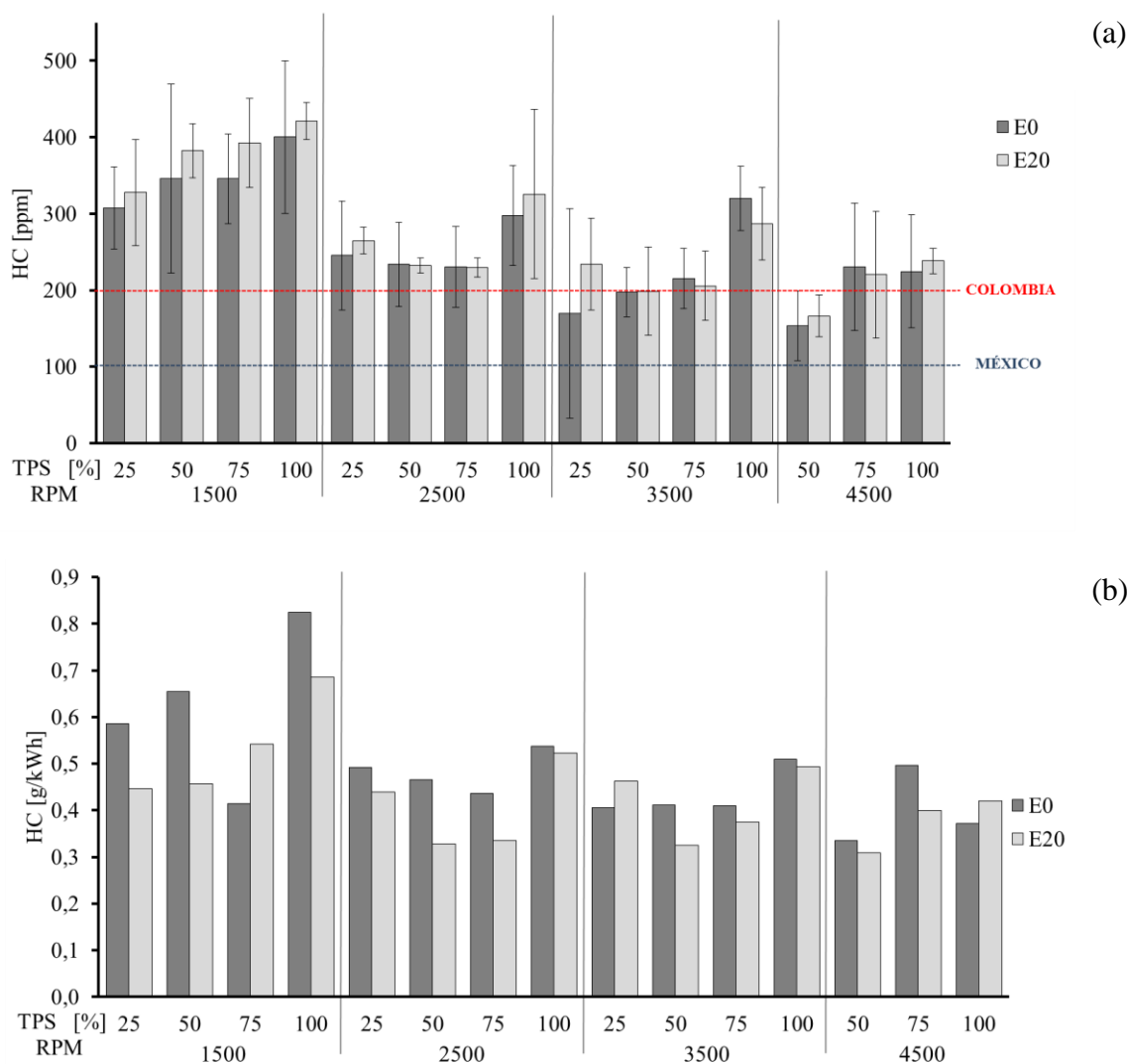


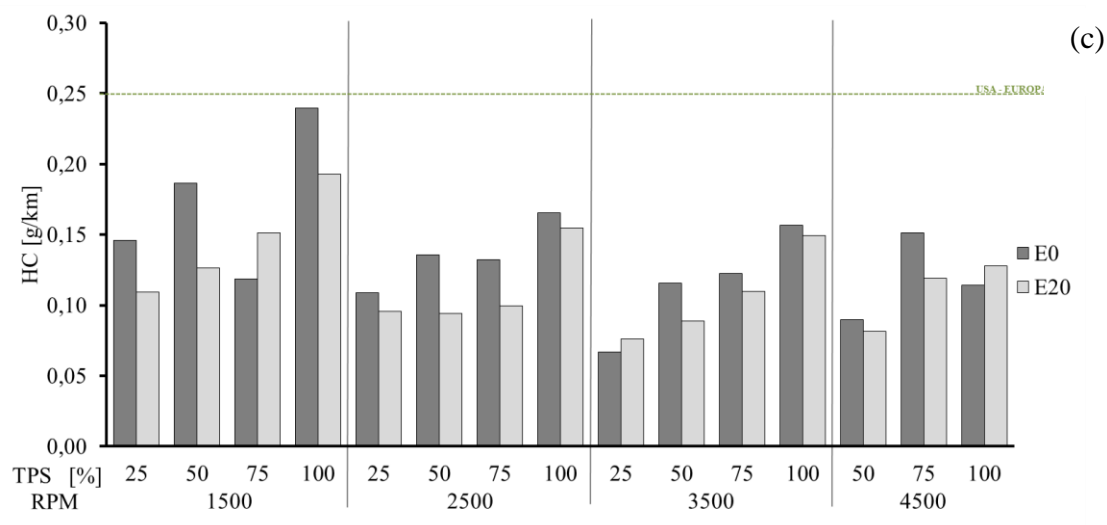
Para el motor de pruebas del vehículo Chevy ensayado en Toluca a 4500 RPM y 75% se presentó la mayor disminución en los índices de emisión con E20 respecto a E0 tanto en [g/kWh] como en [g/km].

4.1.5. Hidrocarburos no quemados – HC CIMA-ITESM (Toluca, México)

En las pruebas realizadas en México con E20 respecto a E0 se registró en promedio una disminución en los HC tanto en las mediciones en concentración volumétrica como en los índices de emisión en [g/kWh] y [g/km] del orden de 5,74%, 9,27% y 11,07% respectivamente.

Figura 14. HC pruebas CIMA – ITESM, (a) [ppm], (b) [g/kWh], (c) [g/km]

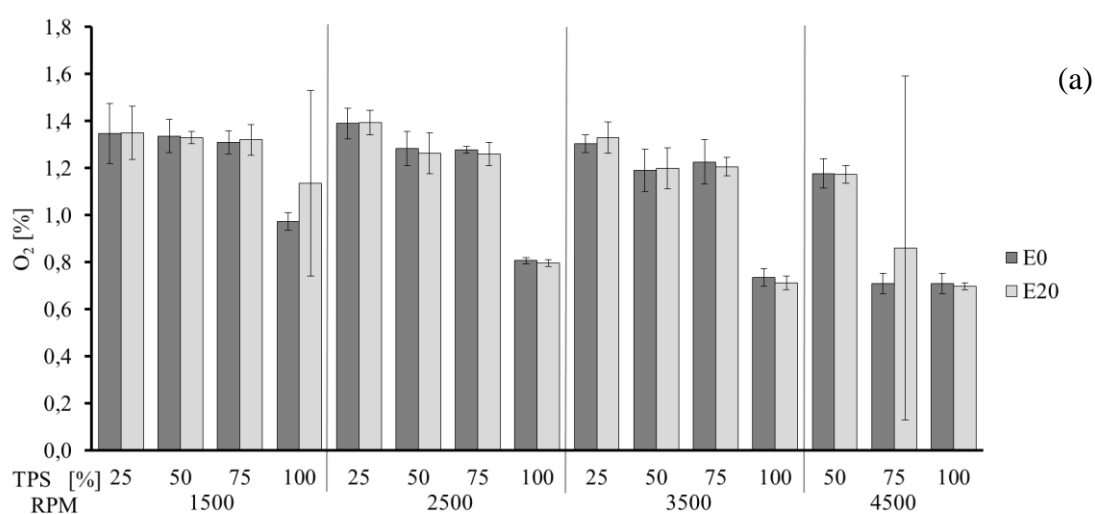


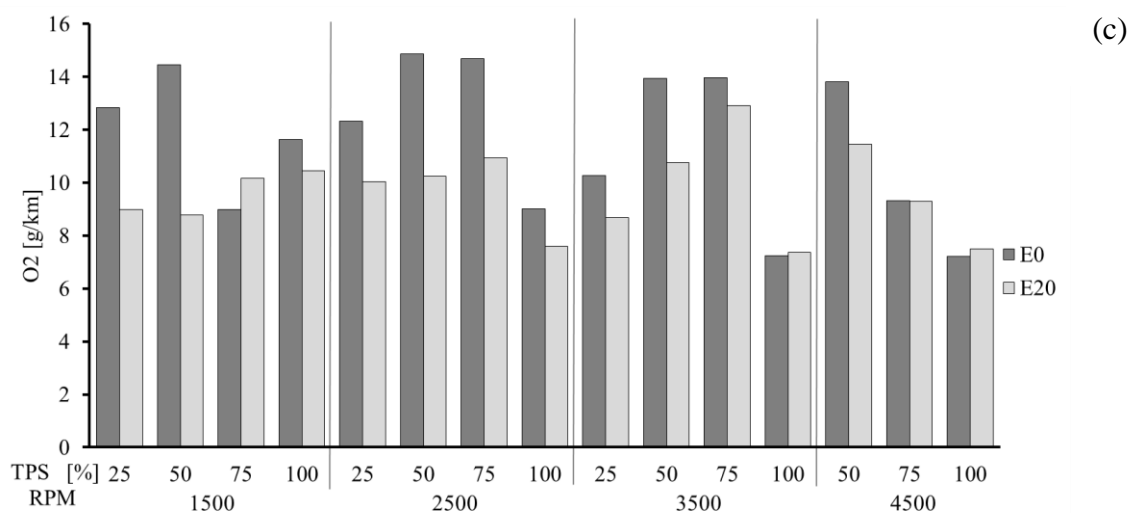
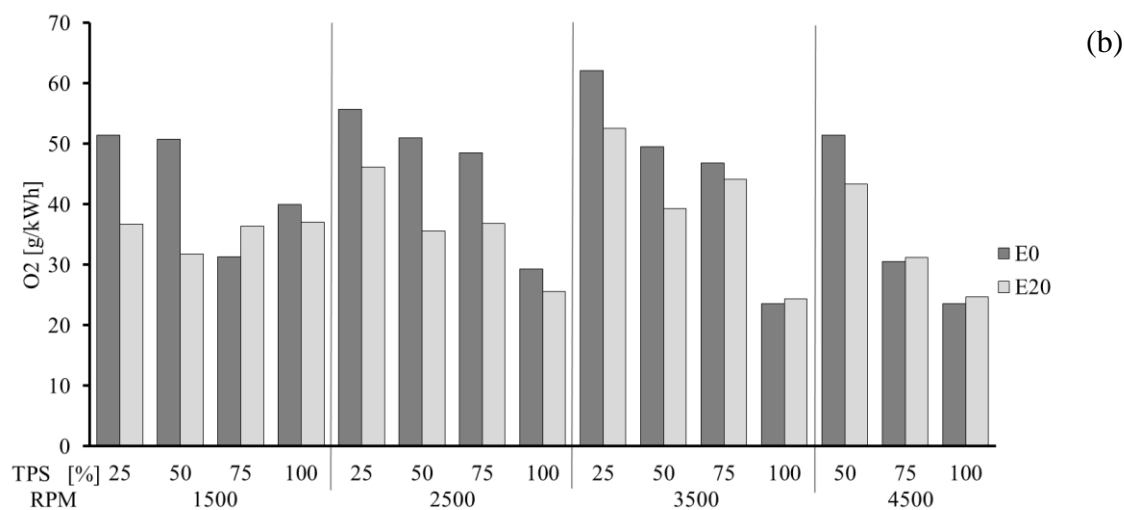


4.1.6. Oxígeno - O₂ pruebas CIMA-ITESM (Toluca, México)

El motor del Chevy ensayado en el CIMA ITESM en Toluca registró en promedio un aumento en la concentración volumétrica de O₂ con E20 respecto a E0, mientras que los índices de emisión en [g/kWh] y [g/km] registraron en promedio una disminución del 12,51% y 14,27% respectivamente.

Figura 15. O₂ pruebas CIMA – ITESM, (a) [%], (b) [g/kWh], (c) [g/km]





El motor Chevy ensayado en Toluca presentó la mitad de los puntos de estado estable de operación con tendencia al aumento del O_2 para el E20 con respecto al E0 y la otra mitad con tendencia a la disminución; a 1500 RPM y 75% de carga se presentó el mayor aumento de los índices de emisión de O_2 con E20 respecto a E0 y a 1500 RPM con 50% de carga se registró la mayor disminución de las emisiones de O_2 con el E20.

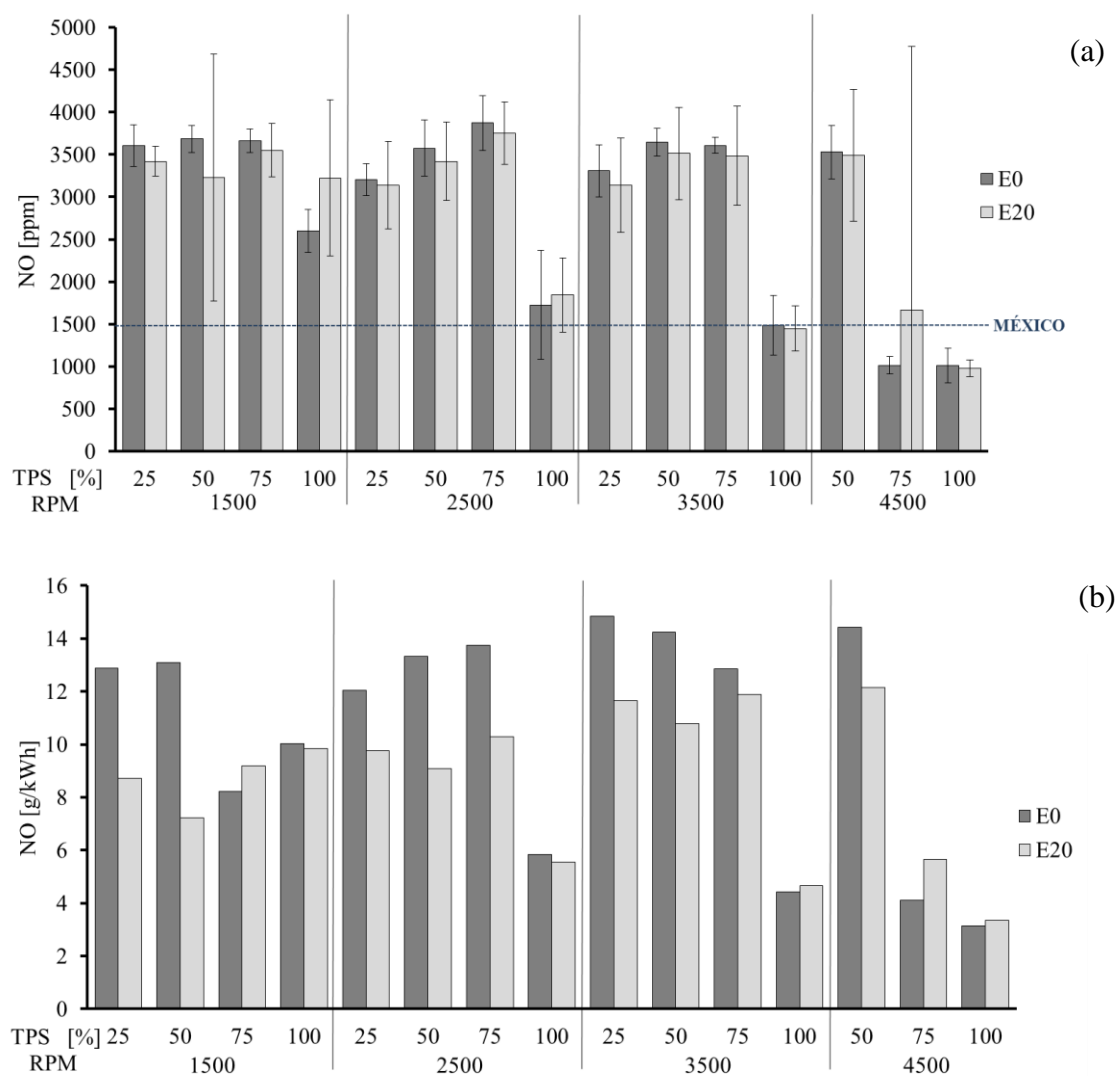
4.1.7. Óxidos de Nitrógeno NO_x pruebas CIMA-ITESM (Toluca, México)

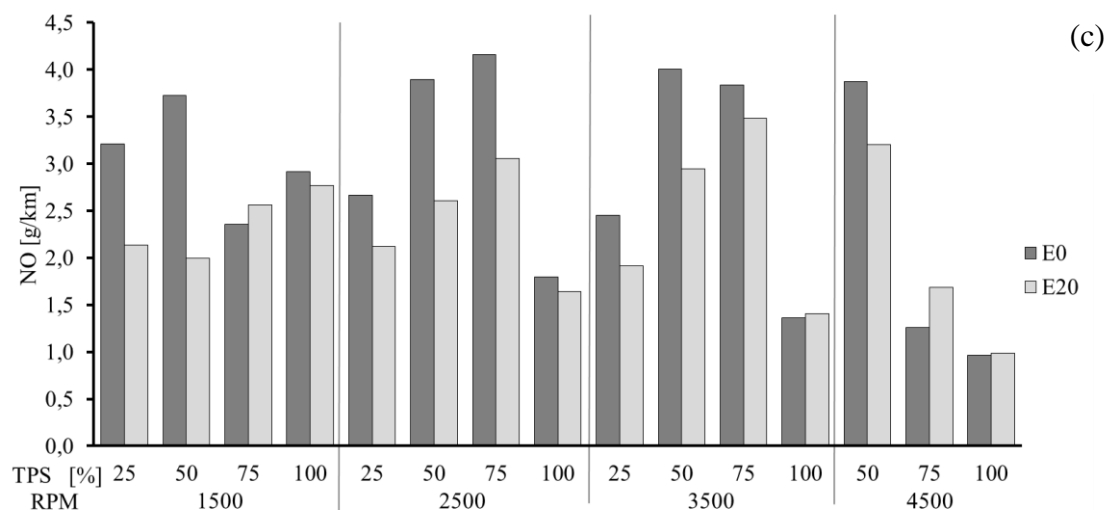
El caso de las emisiones de NO_x medidas en el motor de pruebas ensayado en el CIMA ITESM se registró un incremento en las concentraciones volumétricas del 3,08%, mientras

que luego de los cálculos los índices de emisión de NO_x presentaron una disminución del 11,19% y 13,25% en [g/kWh] y [g/km] respectivamente.

Para el motor del Chevy ensayado en Toluca se registró la mayor disminución en las emisiones de NO en las emisiones entre los quince estados estables de operación probados a 1500 RPM y 50% de carga siendo del 12,41%, 44,78%, 50% en [ppm], [g/kWh] y [g/km] respectivamente.

Figura 16. NO pruebas CIMA –ITESM, (a) [ppm], (b) [g/kWh], (c) [g/km]





4.2. Resultados pruebas vehículo Chevrolet Sail (UTP Pereira, Colombia)

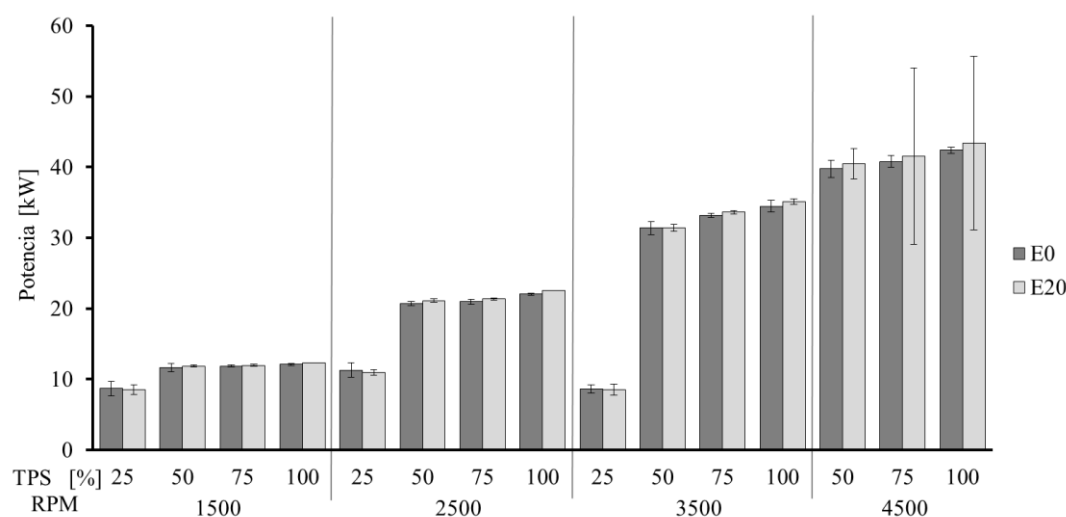
Como alternativa a las pruebas realizadas en el CIMA-ITESM Toluca, con el objeto de realizar futuras comparaciones entre los resultados obtenidos, se realizaron pruebas en el Laboratorio de Pruebas Dinámicas Automotrices de la UTP en Pereira; laboratorio que trabaja bajo la coordinación del Grupo de Investigación en Gestión Energética GENERGÉTICA. Para esta investigación se desarrollaron mediciones en los quince estados estables de operación descritos en la matriz de pruebas detallada en la metodología; al igual que en Toluca se probaron dos combustibles de prueba. Gasolina corriente y mezcla etanol-gasolina E20.

4.2.1. Potencia pruebas (UTP Pereira, Colombia)

En Pereira la potencia del vehículo fue medida el dinamómetro de cubos Dynapack registró en promedio un aumento del 0,9% utilizando E20 frente al E0 (Gasolina sin etanol). Solo en tres de los quince estados estables de operación se registró una disminución en la potencia de acuerdo a lo presentado en la siguiente figura donde se aprecia esto en los tres estados de prueba con 25% de carga debido al parecer a la baja cantidad de combustible con que opera el motor del vehículo en esas condiciones, lo que mostraría que a bajos flujos de combustible

la incidencia del porcentaje de etanol en la mezcla de etanol-gasolina es baja con respecto al combustible sin etanol a iguales condiciones de prueba.

Figura 17. Potencia pruebas LPDA UTP

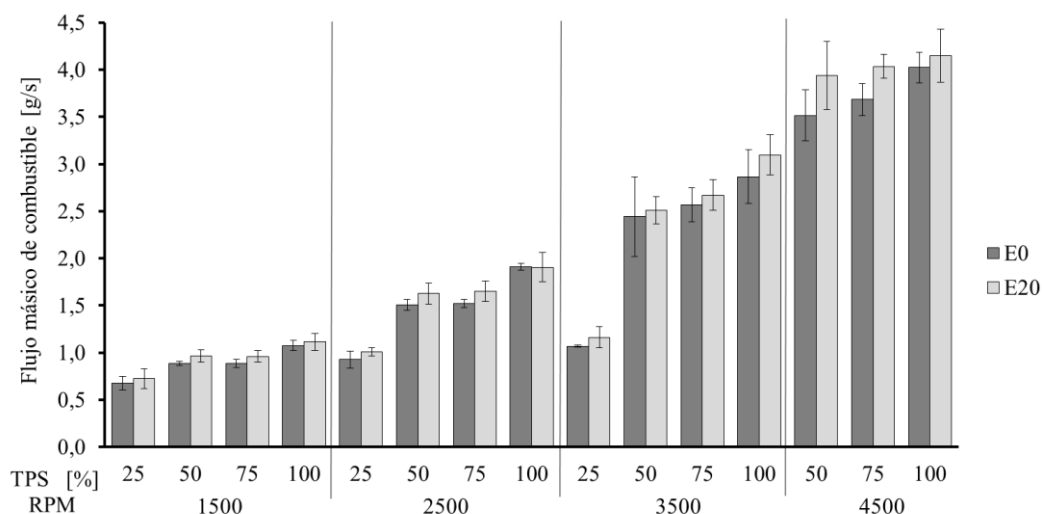


4.2.2. Flujo másico de combustible pruebas (UTP Pereira, Colombia)

El flujo másico de combustible se estudia en este proyecto como variable necesaria para la el cálculo de los índices de emisión en [g/km] y [g/kWh].

En las pruebas realizadas con el vehículo Chevrolet Sail en Pereira se registró en promedio un aumento del 6,7% con E20 con respecto a E0 analizando los quince estados estables de operación ensayados.

Figura 18. Flujo másico de combustible pruebas LPDA UTP

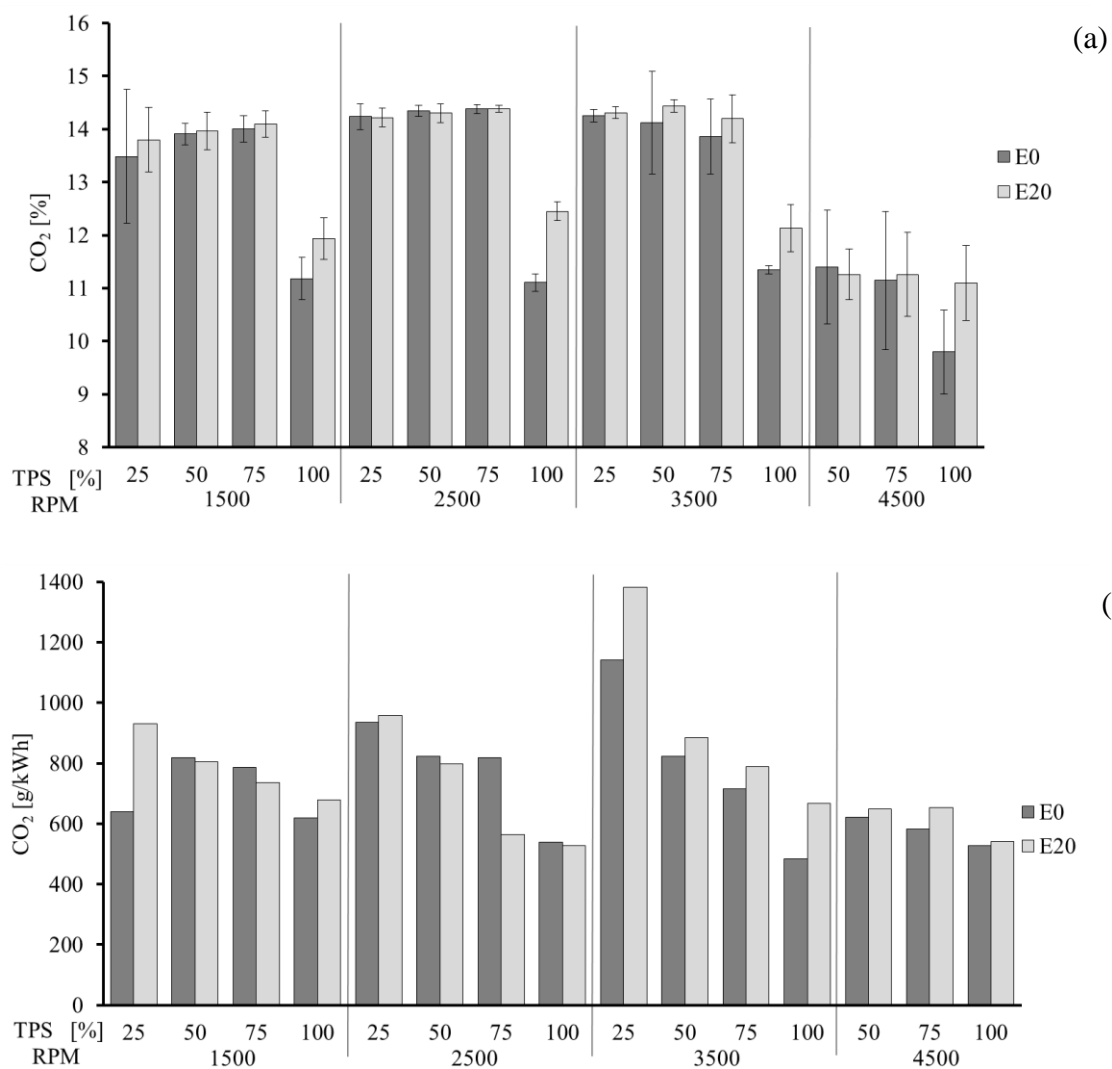


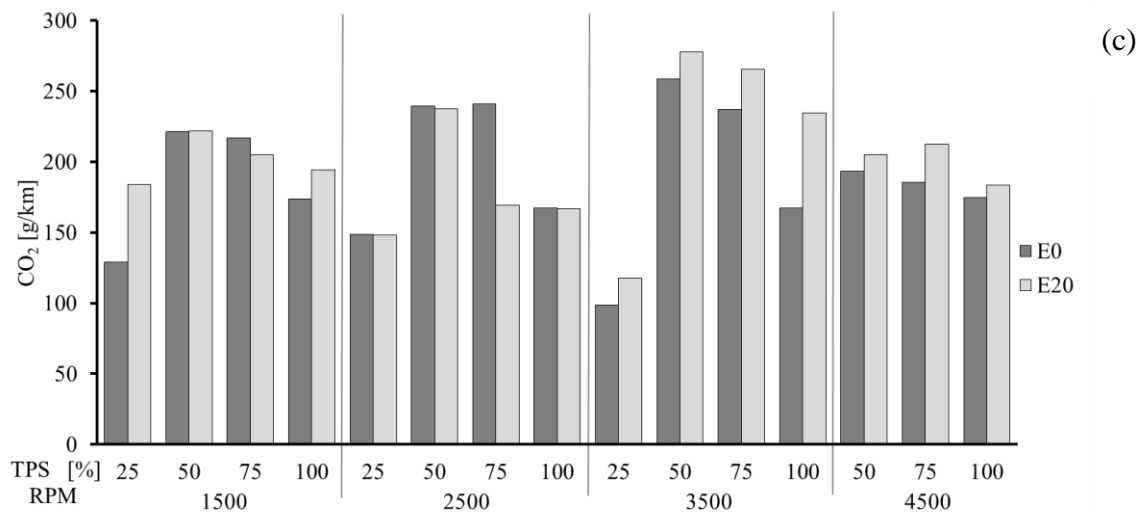
Para el vehículo Chevrolet Sail ensayado en Pereira se registró con E20 el mayor aumento del flujo másico de combustible entre los quince estados estables de operación probados a 4500 RPM y 50% de carga siendo del 12%.

4.2.3. Dióxido de Carbono - CO₂ pruebas (UTP Pereira, Colombia)

En promedio para el motor del vehículo Chevrolet Sail probado en Pereira el CO₂, con E20 aumentó la concentración volumétrica, los índices de emisión en [g/kWh] y [g/km] en 3,12%, 7,3% y 8,2% respectivamente, registrando el mayor aumento en los índices de emisión de CO₂ a 1500 RPM y 25% de carga.

Figura 19. CO₂ pruebas LPDA UTP, (a) [%], (b) [g/kWh], (c) [g/km]



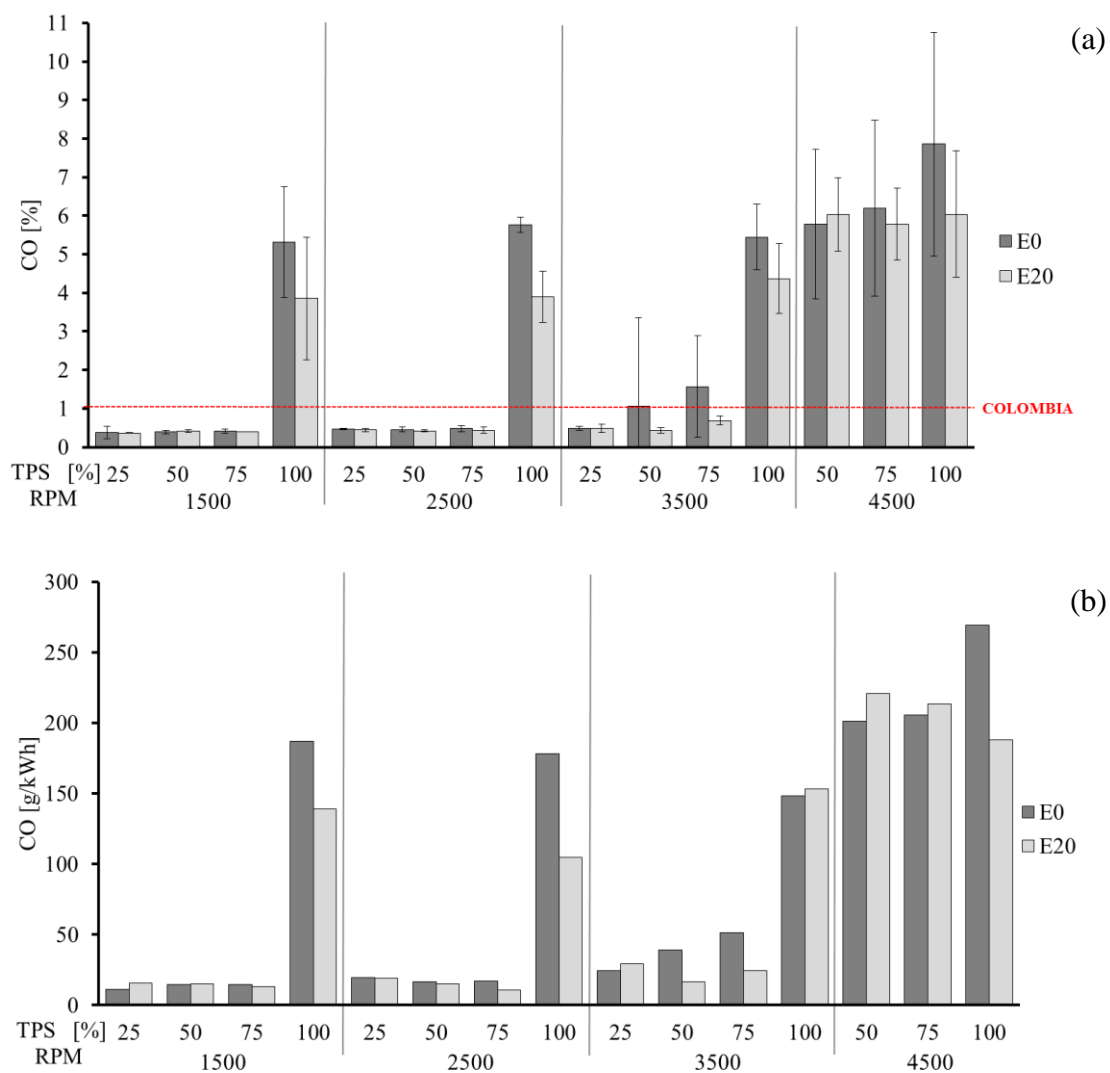


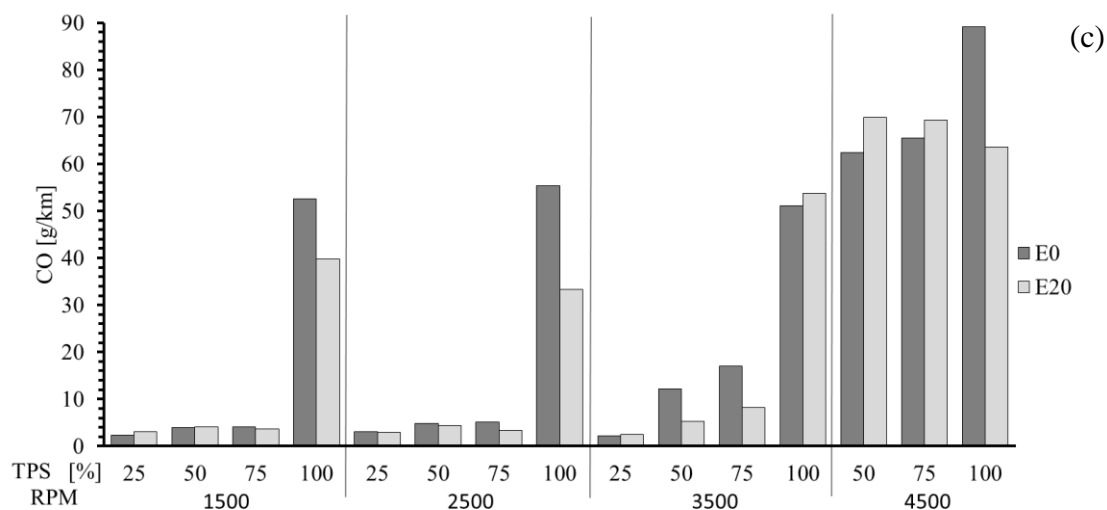
El estado estable de operación en el cual se registró la menor variación del E20 con respecto al E0 en los índices de emisión de CO₂ para la ciudad de Pereira con el motor ensayado se presentó a 1500 RPM con un 50% de carga.

4.2.4. Monóxido de Carbono CO pruebas (UTP Pereira, Colombia)

En Pereira el motor del vehículo Chevrolet Sail registró en promedio con el E20 respecto al E0 una disminución del 16,35%, 12,76% y 12,1% en las emisiones medidas en concentración volumétrica (%), así como los índices de emisión en [g/kWh] y [g/km] respectivamente. En nueve de los quince estados estables de operación ensayados se registró para el vehículo de pruebas con combustible E20 emisiones por debajo del límite establecido por la legislación colombiana factor favorable para la mezcla de etanol-gasolina probada.

Figura 20. CO pruebas LPDA UTP, (a) [%], (b) [g/kWh], (c) [g/km]





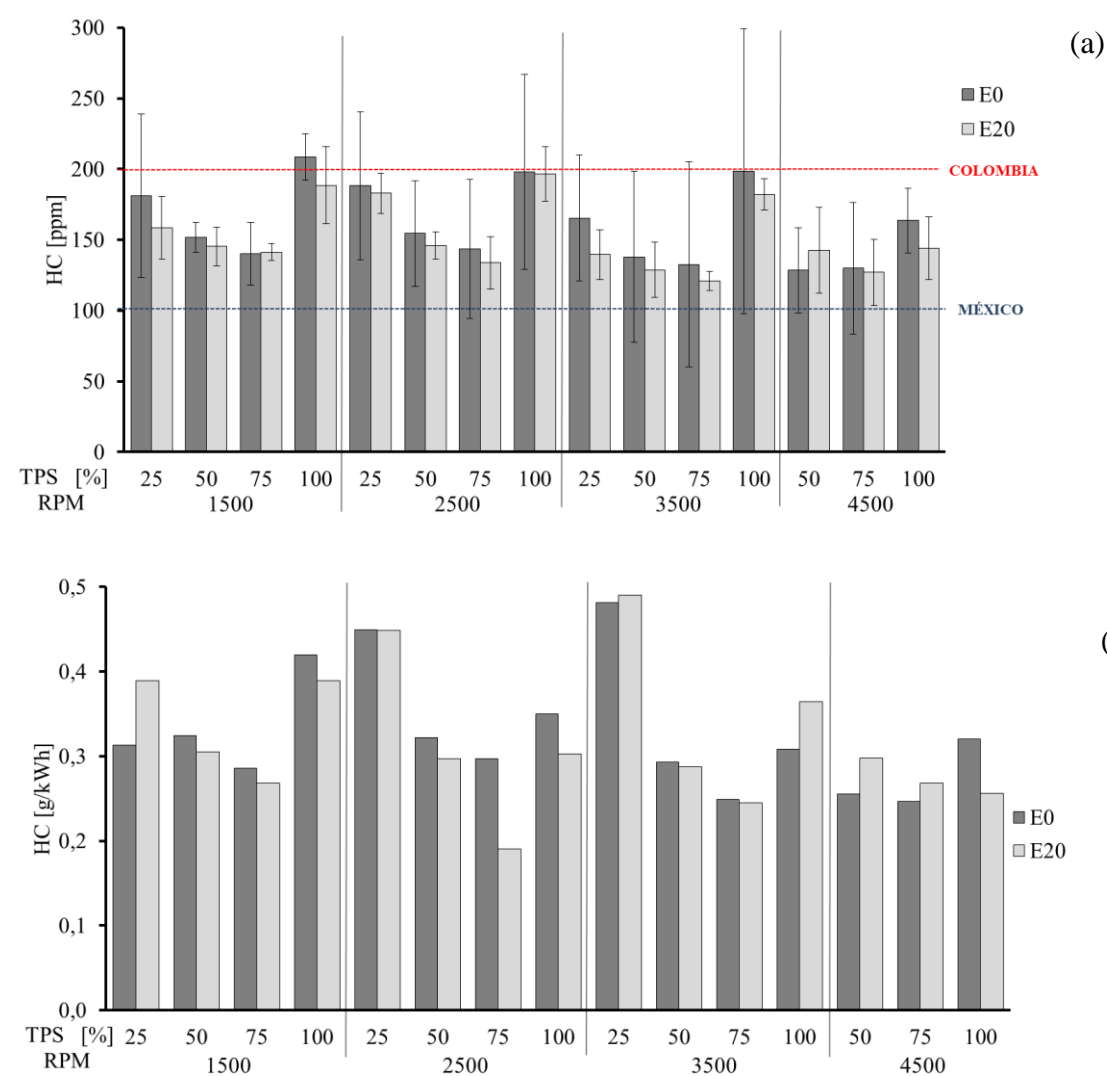
Comparativamente con E20 frente al E0, la mayor disminución del CO con el vehículo Chevrolet Sail ensayado en Pereira se registró a 3500 RPM y 50% de carga.

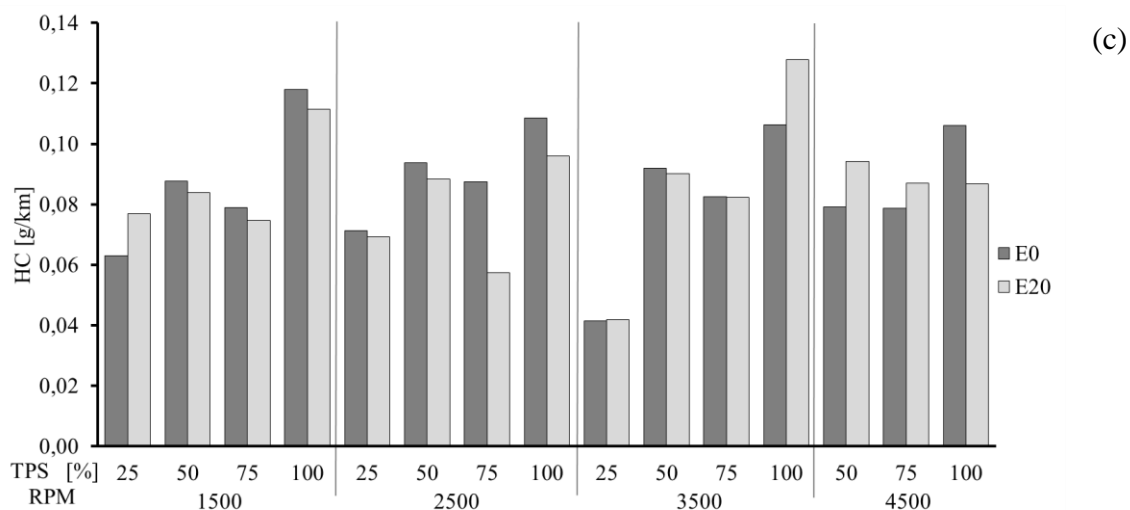
4.2.5. Hidrocarburos no quemados – HC (UTP Pereira, Colombia)

La concentración volumétrica de hidrocarburos no quemados en las emisiones del motor de pruebas ensayado en Pereira registró un aumento en E20 con respecto a E0. El cálculo de los índices de emisión de HC determinó la disminución estos en [g/kWh] y [g/km], acercándose a un 2,01% y 1,18% respectivamente.

A 2500 RPM y 75% de carga se presentó el estado estable de operación con la mayor disminución en estos índices para el E20 respecto al E0.

Figura 21. HC pruebas LPDA UTP, (a) [ppm], (b) [g/kWh], (c) [g/km]

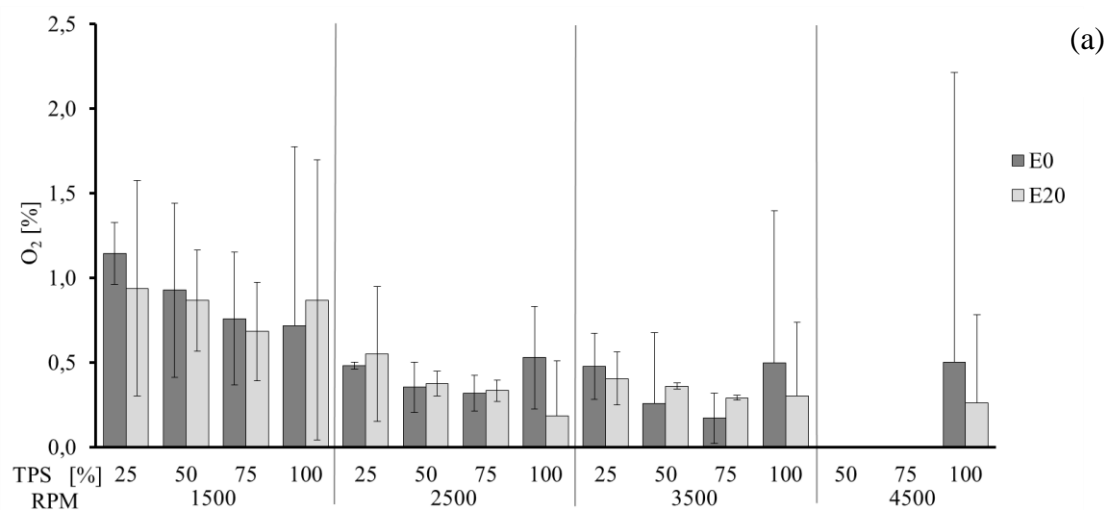


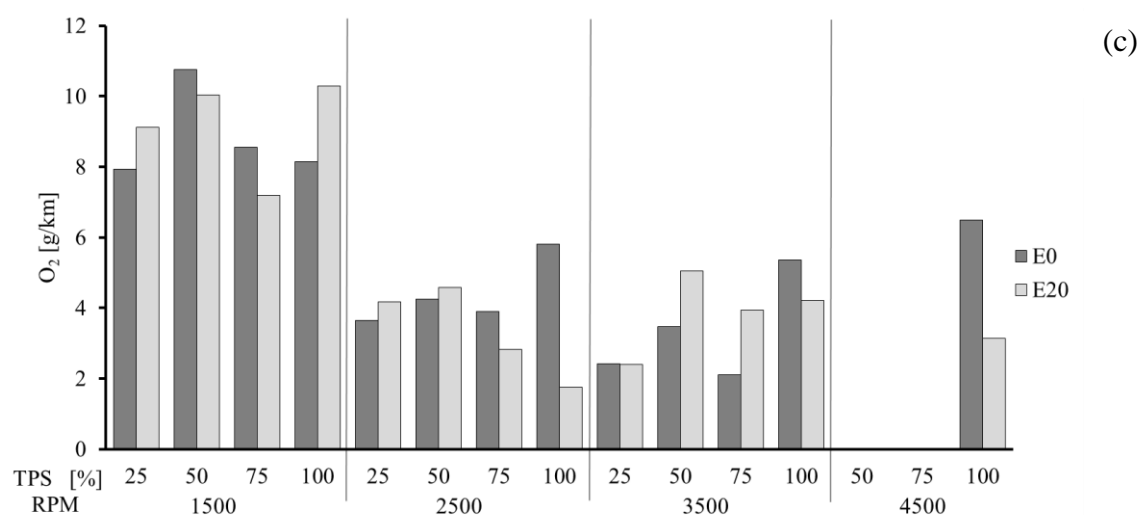
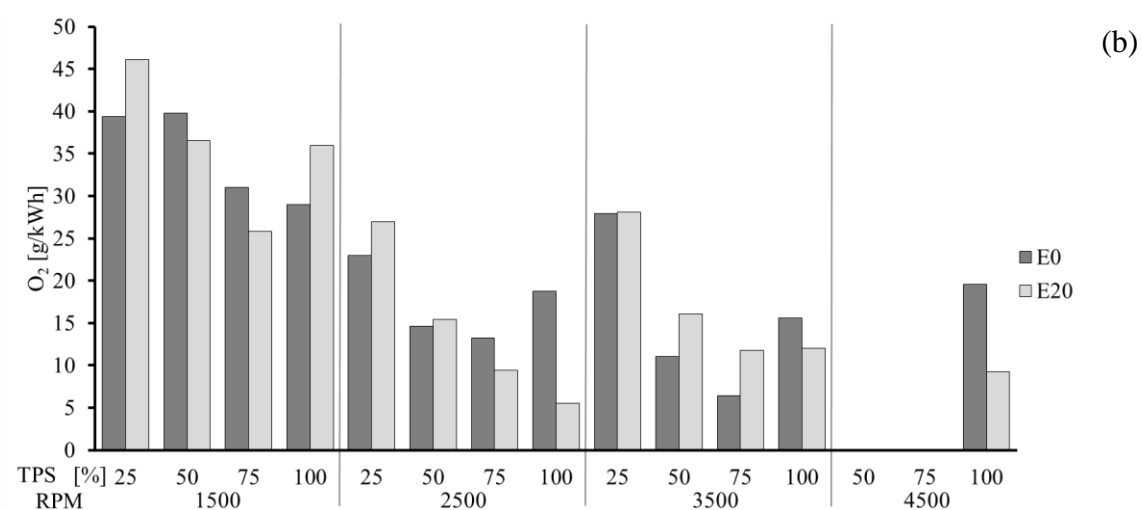


4.2.6. Oxígeno - O₂ pruebas (UTP Pereira, Colombia)

En las pruebas realizadas en el LPDA UTP en Pereira se registró en promedio una disminución en la concentración volumétrica y en el índice de emisión en [g/kWh] de O₂ con E20 respecto a E0 de un 2,9% y 0,32% respectivamente, mientras que el índice de emisión en [g/km] registró en promedio un leve aumento con E20 respecto a E0 del 0,18%.

Figura 22. O₂ pruebas LPDA UTP, (a) [%], (b) [g/kWh], (c) [g/km]





A 2500 RPM y plena carga se registró la mayor disminución de O_2 con E20 respecto a E0 con el motor del Chevrolet Sail ensayado en Pereira.

Analizando a fondo del comportamiento del O_2 en las pruebas de estado estable de operación realizadas con el vehículo de pruebas en Pereira, se observa que en la mitad de los estados probados el O_2 aumentó mientras que en la otra mitad disminuyó. Aunque este fenómeno se presenta, es notorio que la tendencia promedio hacia la disminución de los índices de emisión para el E20 con respecto al E0 es debido a que en la mitad de los puntos en los que se disminuyó la diferencia de los índices entre E20 y E0 es más pronunciada que en los casos en los cuales se registró aumento.

4.2.7. Óxidos de Nitrógeno pruebas (UTP Pereira, Colombia)

En las pruebas realizadas al vehículo Chevrolet SAIL en Pereira se registró un aumento de más del 400% con E20 respecto a E0 haciéndose necesario no tener en cuenta estos resultados de NOx en Pereira con base en los porcentajes variados en los otros estudios revisados dado que se encuentran muy por encima de los rangos “normales” de variación visualizados en los otros estudios. En un principio se pensó que podría ser una altísima variación debido a características particulares de la programación del motor del vehículo de pruebas, pero al verlas de orden de magnitud tan superior, se decide no tener en cuenta estos datos para análisis

4.3. Análisis del comportamiento de las prestaciones de los motores y las emisiones en las dos condiciones de prueba

4.3.1. Análisis del comportamiento de la potencia (Pereira –vs- Toluca)

Uno de los factores influyentes en la diferencia de un motor a otro con respecto al estado estable de operación en el cual se presentan estas disminuciones es la particularidad de cada motor frente a su programación desde la Unidad de Control de Motor ECU por sus siglas en inglés (Engine Control Unit). Ésta particularidad es debida sobre todo a las variaciones en la relación aire combustible para la combustión programada para cada estado estable del motor por disposiciones de cada casa matriz.

Para ambos escenarios de prueba introduciendo variables de operación como la presión atmosférica se espera teóricamente una disminución en la potencia, lo que está en desacuerdo con el resultado obtenido realmente en Pereira; esto se cree que es debido a las diferencias en la medición del flujo másico de combustible en Pereira donde se emplea técnica gravimétrica.

4.3.2. Análisis comparativo del comportamiento del flujo másico de combustible (Pereira –vs- Toluca)

Las diferentes tendencias en el flujo másico de combustible con E20, respecto de E0 que se presentan entre los dos motores y escenarios ensayados; se deben a las distintas características de cada uno de los motores desde la geometría hasta la programación en la que interviene claramente las diferencias en la relación aire combustible con que se programa cada punto de operación de cada motor.

Teóricamente aplicando el modelo CIMA simulador de combustión, se registraron tendencias totalmente opuestas a las encontradas realmente en las condiciones de prueba, lo que invita a mejorar la forma de medición en campo del flujo de combustible y realizar una investigación posterior.

4.3.3. Análisis comparativo del comportamiento del Dióxido de Carbono - CO₂ (Pereira-vs-Toluca)

Contrario a lo registrado en Pereira, pero en consecuencia a la disminución de la potencia y del flujo másico de combustible, las tendencias presentadas en los índices de emisión de CO₂ en los escenarios de pruebas de Toluca y de Pereira fueron distintas pero concuerdan con las mediciones de potencia y flujo másico de combustible en cada lugar de prueba.

En Pereira (1410 m.s.n.m.) por encontrarse a menor altura sobre el nivel del mar que Toluca (2660 m.s.n.m.), la presión atmosférica y la cantidad de aire admitida por el motor son mayores, lo que deriva en mayor admisión de combustible para poder lograr una combustión cercana a la estequiométrica en todos los quince estados estables de operación ensayados.

Los cálculos teóricos de las emisiones de CO₂ realizados con el modelo CIMA y los resultados de las mediciones registradas en ambos escenarios de prueba presentaron tendencias similares en cada lugar de prueba lo que genera confianza en el empleo del modelo CIMA para la predicción de emisiones de CO₂.

4.3.4. Análisis comparativo del comportamiento del Monóxido de Carbono – CO (Pereira –vs- Toluca)

Este gas producto de la combustión presentó, tanto en el motor ensayado en Pereira como en el motor probado en Toluca, una disminución con E20 respecto a E0, como era de esperarse debido al uso de combustibles oxigenados y la contribución del oxígeno presente en el etanol a una combustión más completa.

Al igual en el motor ensayado en Pereira, el motor probado en el CIMA ITESM en Toluca registró en la mayoría de los estados estables de operación, una concentración volumétrica más baja a los límites de la legislación ambiental colombiana siendo favorable para el E20 su utilización bajo las condiciones de prueba.

Solo bajo las condiciones de operación de estado estable en las pruebas del motor de Toluca, se registró en algunos puntos tendencias opuestas en las emisiones de CO, lo que ocurre al parecer debido a sensibilidad en la medición del flujo másico de combustible, la existencia de una medición de la relación aire/combustible un poco inestable traducida en valores irregulares para tenerlos en cuenta en los análisis.

4.3.5. Análisis comparativo del comportamiento de los hidrocarburos no quemados – HC (Pereira-vs-Toluca)

Comúnmente los hidrocarburos presentes en los gases de escape tienen un comportamiento similar al del monóxido de carbono como indicadores de combustión incompleta o exceso de combustible en la mezcla aire combustible previo a la combustión. En el caso de las mezclas de etanol-gasolina se espera una disminución en la presencia de los hidrocarburos no quemados en las emisiones; los índices de emisión como reflejo de la relación entre la cantidad de masa de cada gas producto de combustión y la energía generada por el motor en cada estado estable de operación en el vehículo, presentados en [g/kWh] y [g/km] de HC, tanto en las condiciones de prueba en el CIMA ITESM en Toluca, como en el LPDA UTP en Pereira, registraron en promedio una disminución con E20 respecto a E0.

Cabe resaltar que tanto en los resultados en Pereira como en Toluca se aprecian valores en la concentración volumétrica de HC superiores a los límites establecidos en la legislación ambiental tanto en Colombia como en México, pero es posible que esto se presente dado que ambas muestras de emisiones fueron tomadas sin haber pasado por el convertidor catalítico que ayuda completar la oxidación disminuyendo estas variables. En contraste con esto es alentador ver como en el índice de emisión en [g/km] los resultados tanto con E20 como con E0 estuvieron por debajo de los límites de prueba dinámica establecidos para Europa y Estados Unidos que aunque las condiciones de prueba de esta investigación difieren del ciclo de manejo FTP75 bajo el cual se evalúan los índices en [g/km] en la prueba dinámica, permiten realizar una comparación en la cual los resultados de las pruebas que se realizaron muestran tendencias favorables para ambos combustibles analizados.

4.3.6. Análisis comparativo del comportamiento del Oxígeno - O₂ (Pereira-vs-Toluca)

Para el oxígeno como indicador del exceso de aire en el proceso de combustión según la teoría se espera con el uso de biocombustibles un incremento en su presencia en los gases producto de combustión debido a la característica oxigenante del etanol, pero dadas las particularidades de la programación de la inyección de combustible para cada estado estable de operación, así como de la individualidad de cada vehículo probado, se presentaron tendencias diferentes en cada una de las dos condiciones de prueba en las cuales se realizaron ensayos.

4.3.7. Análisis comparativo del comportamiento de los Óxidos de Nitrógeno – NO_x (Pereira-vs-Toluca)

La aparición de los óxidos de nitrógeno producto de la oxidación del nitrógeno presente en el aire que ingresa al proceso de combustión, normalmente se relaciona con altas temperaturas en la cámara de combustión; existen diferentes posiciones acerca del comportamiento de las emisiones de NO_x con mezclas de etanol gasolina debido a que al incrementar el porcentaje de etanol en la gasolina se espera una disminución del poder calorífico traduciéndose en menor temperatura al interior de la cámara de combustión.

Debido a la propiedad oxigenante del etanol en el combustible se registra una combustión más completa que se traduce en un mejoramiento de la eficiencia de combustión y en algunos estados estables de operación una tendencia a mayores temperaturas con E20 respecto a E0 posibilitando el incremento de los NO_x.

Estudios analizados tienen posiciones encontradas frente al comportamiento de los óxidos de nitrógeno en las emisiones de motores operando con mezclas de etanol y gasolina; algunos hablan de un aumento (CARB 1998; Hsieh et al. 2002), otros presentan resultados con tendencias variables (Kmapp et al. 1998; He et al. 2003), mientras que también se conoce de estudios en los cuales se registra una leve disminución (AVL 2005). En esta investigación se presentan dos escenarios e igualmente dos tendencias.

5. Conclusiones y recomendaciones

5.1. Conclusiones:

La presente investigación permitió realizar la medición de algunas variables que indican el desempeño mecánico, energético y ambiental de un motor liviano y un vehículo operando con mezcla de etanol-gasolina E20 bajo estados estables de operación.

En cumplimiento con el objetivo de esta investigación a partir de los resultados de las mediciones realizadas se calcularon los índices de emisión en [g/kWh] y [g/km] para cada uno de los estados estables de operación en los cuales se probaron, tanto el vehículo como el motor con la mezcla de etanol-gasolina E20 y con gasolina corriente sin etanol como combustible base de comparación.

En el desarrollo de esta investigación se han alcanzado los objetivos planteados:

- Realizar un seguimiento al comportamiento de variables de operación del motor como revoluciones por minuto, porcentaje de posición del acelerador, relación aire-combustible y sensor de presión de admisión; durante pruebas de laboratorio con un vehículo liviano operando en régimen de estado estable con mezcla etanol-gasolina E20 y con gasolina magna.
- Medir las emisiones contaminantes en régimen de estado estable operando con mezcla etanol-gasolina E20 y gasolina magna, generadas por un vehículo liviano durante las pruebas de laboratorio de NO_x, CO, CO₂, HC en [g/kWh].
- Comparar entre los resultados de las pruebas experimentales y los valores esperados tras el análisis teórico de la combustión.

Luego de la revisión bibliográfica realizada y conocer los distintos métodos de medición de emisiones; se concluye que la propuesta planteada en este estudio de realizar los cálculos de los índices de emisión para cada estados estable de operación probado; surge como una herramienta útil para la programación y puesta a punto de los motores determinando el comportamiento de las variables de operación en cada uno de los estados estables de ensayados.

A pesar del valor comparativo de los datos obtenidos experimentalmente, no es posible generalizar los resultados obtenidos bajo las dos condiciones de prueba, debido a la diferencia entre los motores ensayados así como las condiciones de presión atmosférica que influyen en la toma de aire para la combustión.

Dado que cada uno de los dos motores probados tiene programada su inyección de combustible de modos distintos y que la medición de las emisiones se realizó antes de los convertidores catalíticos; las tendencias en los resultados de las emisiones pueden ser diferentes.

Los índices de emisión medidos en distintos puntos de estado estable de operación son de utilidad para analizar la generación de emisiones con respecto a las prestaciones otorgadas por el motor a través del mapa de programación del motor.

5.2. Resultados:

Acerca del comportamiento de cada una de las variables que indican el desempeño mecánico, energético y ambiental de un motor liviano y un vehículo operando con mezcla de etanol-gasolina E20 bajo estados estables de operación y propiedades atmosféricas de cada lugar de prueba se puede concluir que:

- La potencia registró un leve cambio con el E20 respecto al E0 con diferente comportamiento en los dos escenarios de prueba en Pereira con el motor del Chevrolet Sail se registró un aumento, mientras que en Toluca con el motor del Chevy se presentó una disminución; esto propio de la programación de cada motor y debido al trabajo en altura al cual es sometido el motor en Toluca.
- El flujo másico de combustible presentó un aumento con E20 en el vehículo probado en Pereira, mientras que registró una disminución en el motor ensayado en Toluca, lo que

va de acuerdo a los resultados de la potencia dado que para obtener mayor potencia comúnmente es necesario un aumento en el flujo de combustible adicionado a la combustión.

- El motor del Chevrolet Sail probado en Pereira funciona en la mayoría de estados estables de operación bajo condiciones de mezcla pobre en combustible debido a su programación de inyección para disminuir el consumo de combustible y emisiones reguladas; el aumentos de potencia y flujo másico de combustible para la mezcla de etanol gasolina se debe a las características de aditivo oxigenante del etanol reflejadas en una combustión más completa reflejándose en un aumento de las emisiones de CO₂ y la disminución de las emisiones de CO y HC.
- El motor del Chevy probado en el CIMA ITESM Toluca registró una disminución de la potencia y el flujo másico de combustible para la mezcla de etanol gasolina reflejada en una combustión incompleta reflejándose en una disminución de las emisiones de CO₂ y el aumento de las emisiones de CO y HC. Todo esto se asume debido a la programación de la inyección de combustible del motor diseñada para operar con mezcla rica, así como la ausencia de oxígeno debido a la menor presión atmosférica en Toluca con respecto a Pereira.
- Las pruebas en estados estables de operación para motores livianos se presentan como una opción para analizar más en detalle el comportamiento del motor con diferentes fuentes de energía o incluso el comportamiento de las emisiones del mismo.

5.3. Recomendaciones:

Concluida esta investigación, se considera pertinente proponer:

- Realizar futuros estudios en los cuales se realicen pruebas con el mismo motor a distintas alturas sobre el nivel del mar para poder correlacionar las emisiones y las prestaciones del motor con la variación de la presión atmosférica.

- Probar otros porcentajes de mezcla de etanol-gasolina para determinar la incidencia de la concentración de etanol en la mezcla sobre los índices de emisión en estados estables de operación.
- Realizar pruebas con un automóvil o un motor equipados con una computadora programable de control de inyección para determinar posibles variaciones en la programación de los motores a partir de las diferentes mezclas de etanol y gasolina probadas.

BIBLIOGRAFÍA

- AA Abdel-Rahman, M. O. (1997). Experimental investigation on varying the compression ratio of SI engine working under different ethanol–gasoline fuel blends. *International Journal of Energy Research*, 31-40.
- Agarwal, A. .. (2007). Biofuels (alcohol and biodiesel) applications as fuels for internal combustion engines. *Progress in Energy and Combustion Science* 33, 233-271.
- API, A. P. (1998). *Alcohol and ethers, a technical assessment of their application as fuel and fuel components*. American Petroleum Institute, Washington.
- AVL, E. K. (2005). *Blending of ethanol in gasoline for spark ignition engines*. AVL.
- Baena, L. M. (2012). Aggressiveness of 20% bioethanol - 80% gasoline mixture on autoparts: I behavior of metallic materials and evaluation of their electrochemical properties. *Fuel* 95, 320-328.
- Baena, L. M. (2012). Aggressiveness of a 20% bioethanol - 80% gasoline mixture on autoparts: II Behavior of polymeric materials. *Fuel* 95, 312-319.
- BNDES, C. y. (2008). *Bioetanol de caña de azúcar - Energía para el desarrollo sostenible*. Rio de Janeiro.
- CARB-CEPA. (1998). *Comparison of the Effects of a Fully-Complying gasoline blend and high RVP ethanol gasoline blend on exhaust and evaporative emissions*. Sacramento, CA: California Air Resources Board and Californial Environmental Protection Agency.
- David Kittelson, A. T. (2008). *Demonstration and driveability project to determine the feasibility of using E20 as a motor fuel*. Minneapolis: Minnesota Department of Agriculture.
- DELPHI. (2010). Worldwide emissions standards heavy duty & off-road vehicles.
- Dieselnet. (2013). *Dieselnet*. Recuperado el 2013, de <https://www.dieselnet.com/standards/cycles/#us-ld>

- EPA. (2013). *US Environmental Protection Agency*. Recuperado el 2013, de <http://www.epa.gov/otaq/sftp.htm>
- General Motors. (2014). Obtenido de <http://www.chevrolet.com.co/sail-sedan-carro-elegante/caracteristicas.html>
- Goldemberg, M. y. (1994). The Bracilian Alcohol Program - An overview. *Energy for Sustainable Development*, 1(1).
- He, B.-Q., Jian-Xin, W., Hao, J.-M., Yan, X.-G., & Xiao, J.-H. (2003). A study on emission characteristics of an EFI engine with ethanol blended gasoline fuels. *Atmospheric Environment*, 37, 949–957.
- Kittelson D., T. A. (2008). *Demonstration and Driveability Project to Determine the Feasibility of using E20 as Motor Fuel*. Final report to Minnesota Department of Agriculture, University of Minnesota, Department of Mechanical Engineering, Minnesota, Minneapolis.
- Knapp K., S. F. (1998). The effect of ethanol fuel on the emissions of vehicles over a wide range of temperatures. *Air waste management association*, 646-653.
- Martha Amaya, M. V. (2013). *Colombia towards the diversification of fuel blend E20 (gasolina 80% - ethanol 20%) in its vehicle fleet. Successful case testing fuel blend E20. Biofuel for urban and rural innovation*. Bogotá: Minminas, Ecopetrol, UTP.
- Minambiente. (2008). Resolución 910 por la cual se reglamentan los niveles permisibles de emisión de contaminantes que deberán cumplir las fuentes móviles terrestres, se reglamenta el artículo 91 del Decreto 948 de 1995 y se adoptan otras disposiciones. Bogotá, Cundinamarca, Colombia.
- NREL. (2009). *Effects of intermediate ethanol blends on legacy vehicles and small Non-Road engines*. Denver: National Renewable Energy Laboratory.
- NREL., V. K. (2012). *Comparative emissions testing of vehicles aged on E0, E15 and E20 fuels*. Aurora, Colorado: National Renewable Energy Laboratory.

- NREL-ORNL., K. K. (2009). *Effects of intermediate ethanol blends on legacy vehicles and small non-road engines, report 1 - updated*. USA: National Renewable Energy laboratory - Oak Ridge National Laboratory.
- Olvera, M. (2010). *Etanol sustituto variable de la gasolina y su impacto en el medio ambiente*. Guanajuato: Universidad de Guanajuato.
- Rios L.C, T. J. (2012). *Protocolo E20*. Pereira: Universidad Tecnológica de Pereira, Grupo de investigación en gestión energética - GENERGETICA.
- SEMARNAT. (2007). *Norma oficial mexicana NOM-041-SEMARNAT-2006, que establece los límites máximos permisibles de emisión de gases contaminantes provenientes del escape de los vehículos automotores en circulación que usan gasolina como combustible*. México D.F.: Diario oficial.
- Torres. J, M. D. (13 de Noviembre de 2002). Estudio de la mezcla de gasolinas con 10% de etanol anhidro. *CT&F - Ciencia Tecnología y Futuro*, 2(3), 71-82.
- Wei-Dong Hsieh, R.-H. C.-L.-H. (2002). Engine performance and pollutant emission of an SI engine using ethanol-gasoline blended fuels. *Atmospheric Environment*, 36, 403-410.

ANEXOS

Anexo 1. Equipos utilizados en el LPDA - UTP (Pereira, Colombia)

Para la medición de las variables necesarias para calcular los índices de emisión del vehículo de prueba operando en las condiciones de estado estable programadas en la matriz experimental, se emplearon los siguientes equipos:

- **Analizador de gases:** Galio SMART 2000 XXX y previo a la realización de cada prueba se calibró según procedimiento interno del Laboratorio de Pruebas Dinámicas Automotrices de la UTP – LPDA.

Tabla 14 Ficha técnica analizador de emisiones Galio SMART XXX

Gas	Rango	Principio de medición	Rangos de medición	Precisión	Desempeño
HC, como n-hexano	0 a 10000ppm	Infrarrojo no dispersivo (NDIR)	0–10000 ppm	4 ppm	5% Relativo
Monóxido de carbono, CO	0 a 100%	Infrarrojo no dispersivo (NDIR)	0 – 10% volumen	0,06 % Absoluto	5% Relativo
Dióxido de carbono, CO₂	0 a 20%	Infrarrojo no dispersivo (NDIR)	0 – 20% volumen	0,03% Absoluto	5% Relativo
Oxígeno, O₂	0 a 25%	Celda electroquímica	0 – 25% volumen	0,1% Absoluto	5% Relativo
Óxidos de nitrógeno, NOx	0 a 4000ppm	Celda electroquímica	0 – 4000 ppm	120 Absoluto	

De las cinco emisiones que mide el equipo analizador, tres de ellas (CO, CO₂ y HC) son medidas con el principio de medición sugerido por la EPA CFR 40 parte 1065 esperándose

por ello confiabilidad en los resultados. Lo anterior sumado a la respectiva calibración realizada antes de las pruebas con un gas patrón permite garantizar un buen punto de partida para la ejecución de las pruebas y la obtención de resultados.

- **Dinamómetro:** en esta investigación se utilizó un dinamómetro marca Dynapack de referencia 2000 Nm. Este equipo es conocido como dinamómetro de cubos debido su configuración, consta de dos módulos (cubos) a los cuales se acopla el eje de tracción del vehículo luego de desacoplar las ruedas y en su operación permite medir el par de torsión y la potencia en función del rango de revoluciones del motor.

Como complemento este equipo cuenta con un sensor de oxígeno de banda ancha (wideband) el cual permite determinar la relación aire-combustible (AFR) mientras se ejecutan las pruebas.

Figura 23. Vehículo de prueba instalado en el dinamómetro Dynapack



Cada cubo de este dinamómetro está constituido por: una bomba hidráulica, un transductor de presión, una electroválvula, un depósito de aceite, un sensor óptico de revoluciones y un sistema de acople del cubo a la mordaza. El eje de las ruedas del vehículo gira con el acople del cubo a las mordazas, por consiguiente hace girar el rotor de la bomba presentándose flujo de aceite en el interior del sistema del cubo. Con la operación de la bomba hidráulica se registra en el interior del sistema una variación en la presión del aceite proporcional a la

velocidad de giro del rotor, esta variación es sensada por un sensor transductor de presión que convierte esta señal en una corriente eléctrica y se registra el valor del par de torsión que relacionado con la velocidad de giro, permite conocer la potencia. La electroválvula se encarga de restringir el flujo realizando el control de carga que hace el dinamómetro para la medición del par de torsión así como la estabilización o freno en los distintos estados estables de operación para las realizadas.

Figura 24. Parte interna dinamómetro de cubos



Tabla 15 Ficha técnica dinamómetro Dynapack

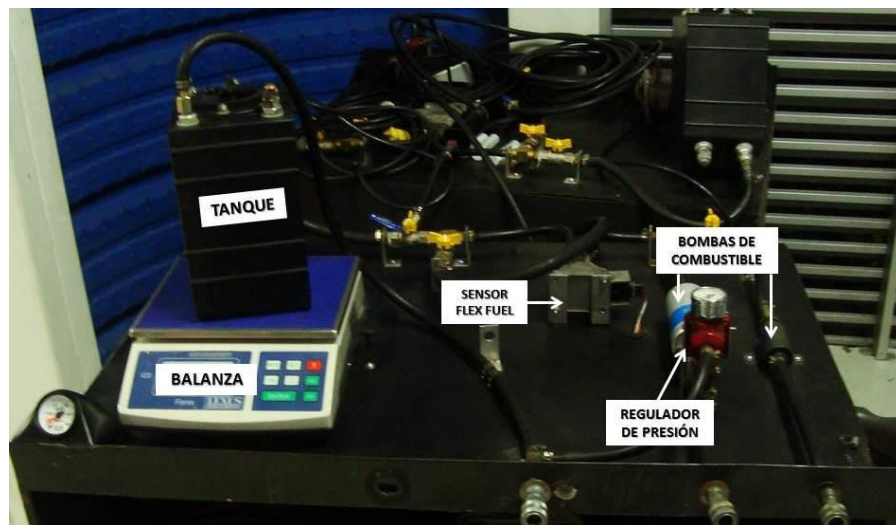
Parámetro	Características
Tipo	Cubos
Velocidad Máxima acoples	2200 RPM
Medición del par de torsión	0-2000 Nm
Medición de potencia	0-300 kW

- **Módulo de consumo de combustible:** este equipo está integrado por una balanza digital con una resolución de 0,5 g, además de dos bombas eléctricas externas de combustible

que proporcionan presiones en dos rangos de operación diferentes dependiendo la tecnología de alimentación de combustible en los vehículos de pruebas (sistema con carburador o inyección electrónica).

El módulo está equipado con un tanque auxiliar de almacenamiento de combustible al igual que con un regulador de presión que permite ajustar la presión del sistema de alimentación de combustible instalado en el módulo según las especificaciones de la línea de combustible del vehículo de pruebas.

Figura 25. Módulo de consumo de combustible LPDA



Anexo 2. Equipos utilizados en el CIMA - ITESM (Toluca, México)

La celda de prueba de motores del CIMA es el fruto de un arduo trabajo de personal del centro de investigación y cuenta con una serie de equipos que se describen a continuación los cuales hicieron posible la adquisición de la información necesaria para el posterior cálculo de los índices de emisión en [g/kWh] y [g/km].

- **Dinamómetro marca Super Flow modelo F-902** con capacidad para probar motores hasta de 1119 kW (1500 HP).

Figura 26. Dinamómetro Super Flow F-902



Este dinamómetro cuenta con un freno hidráulico y suministro de agua para la refrigeración del equipo mismo y del motor de pruebas, además de un control de temperatura del sistema de recirculación de agua para no permitir sobrecalentamientos que vayan en detrimento del equipo o del motor que se está ensayando.

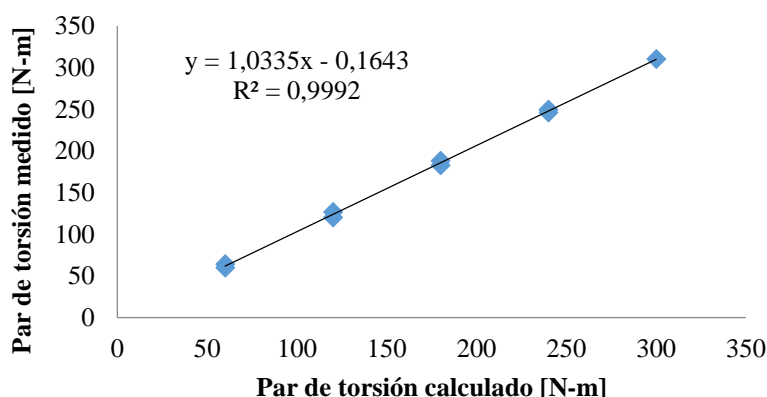
A continuación se presentan algunas características técnicas del dinamómetro Super Flow:

Tabla 16 Ficha técnica dinamómetro Super Flow F-902

Parámetro	Características
Tipo	Hidráulico
RPM máximas	10000 RPM
Medición del par de torsión	0-1350 Nm
Medición de potencia	0-1118 kW
Tacómetro	0-22000 RPM

Para comprobar el funcionamiento de los elementos de medición directa del dinamómetro, se realizó una comparación con elementos previamente calibrados para conocer la confiabilidad de los datos obtenidos. Los resultados de las comparaciones se presentan a continuación.

Figura 27. Validación medida del par de torsión con celda de carga dinamómetro Superflow F-902



- **Analizador de emisiones Infrared FGA 4000XD:** Para la medición de las emisiones en el CIMA se empleó un equipo muestreador y analizador de emisiones vehiculares marca Infrared y referencia FGA-4000XD que permite medir la fracción volumétrica de CO, HC, CO₂, O₂, NO_x y el valor de λ para los gases emitidos durante las pruebas. Previo a la realización de las mediciones que se tuvieron en cuenta para este estudio se realizó una calibración del equipo.

Figura 28. Analizador de emisiones Infrared FGA-4000XD



En estas pruebas no se empleó la habitual sonda de muestreo que se ubica en el tubo de escape de los gases en los vehículos, sino que dadas las características de la celda de pruebas de motores y la necesidad de muestrear los gases antes del catalizador, se ubicó una salida de muestreo extra entre el múltiple de escape y el catalizador para desde ahí tomar los gases y llevarlos por una línea extra de acero inoxidable hasta el analizador.

Entre las características técnicas del equipo analizador y que se reportan en la siguiente tabla sobresale el cumplimiento de los métodos de medición de las emisiones sugeridos por la Agencia Ambiental de los Estados Unidos - EPA para la medición del monóxido de carbono CO y del dióxido de carbono CO₂ lo que brinda confiabilidad sobre los resultados de las mediciones de estos dos gases y de los reportes para posteriores análisis.

Tabla 17 Características analizador de emisiones FGA-4000XD

Gas	Rango	Principio de medición	EPA CFR 40 parte 1065
HC, como n-hexano	0 a 10000ppm	Infrarrojo no dispersivo (NDIR)	Detector de Ionización de flama (FID)
Monóxido de carbono, CO	0 a 100%	Infrarrojo no dispersivo (NDIR)	Infrarrojo no dispersivo (NDIR)
Dióxido de carbono, CO₂	0 a 20%	Infrarrojo no dispersivo (NDIR)	Infrarrojo no dispersivo (NDIR)

Oxígeno, O₂	0 a 25%	Celda electroquímica	Detección Paramagnética (PMD)
Óxidos de nitrógeno, NO_x	0 a 4000ppm	Celda electroquímica	Detector Químico luminiscente (CLD)

- **Sensor de presión tipo bujía marca Kistler:** en este proyecto se utilizó este sensor para monitorear al interior de la cámara de combustión en uno de los cilindros del motor de prueba, la variación de la presión durante todo el proceso de combustión en las pruebas realizadas obteniendo esta información para posteriores análisis e investigaciones en las cuales se determine la variación de la presión en la combustión cambiando los porcentajes de etanol en la gasolina.

Figura 29. Bujía sensor de presión Kistler



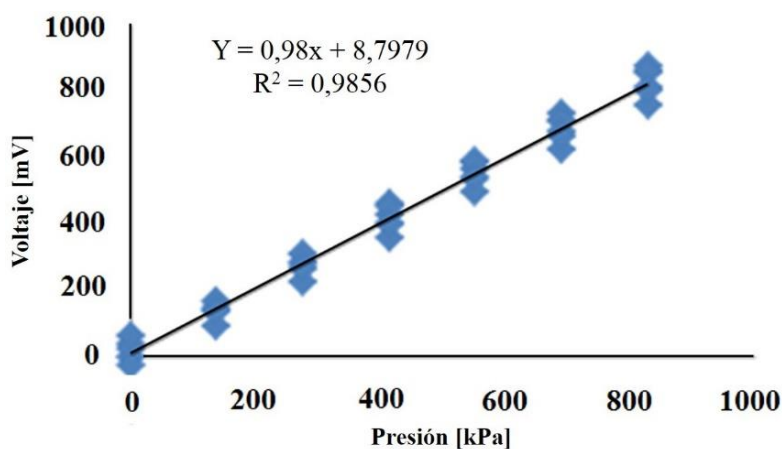
Las características técnicas del sensor de presión tipo bujía se pueden apreciar en la siguiente tabla. Se realizó además un ejercicio de reconocimiento de la señal eléctrica emitida por el sensor variando la presión y comparando con un manómetro calibrado acoplados a un gas presurizado; esto con la intención de tener mejor conocimiento del sensor y el manejo de la señal.

Tabla 18 Características bujía sensor de presión Kistler

Característica	Valor
Presión máxima	200 bar
Temperatura máxima de funcionamiento	320°C
Sensibilidad	10 pC/bar

El ejercicio de reconocimiento de la señal del sensor de presión tipo bujía arrojó como resultado una gráfica donde se aprecia el comportamiento de la presión medida con el equipo y el voltaje arrojado por el mismo.

Figura 30. Reconocimiento de la señal de la bujía sensor de presión Kistler



La correlación entre la presión medida y la señal de diferencia de potencial emitida por el sensor refleja un comportamiento estable del mismo y por ende una alta confiabilidad en los valores obtenidos.

La celda de prueba de motores del CIMA cuenta con un equipo medidor de revoluciones acoplado al eje del cigüeñal del motor que permite monitorear la velocidad angular del motor para las diferentes pruebas y los ángulos de giro para relacionar esta información con la reportada por el sensor de presión tipo bujía y poder obtener las gráficas correspondientes.

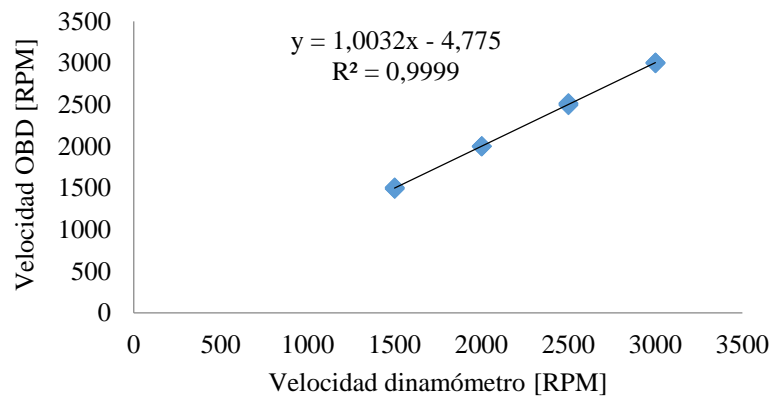
De este equipo medidor de revoluciones hay que resaltar su precisión dinámica que permite tener alta confiabilidad en su medida para las investigaciones realizadas. A continuación se presentan las características técnicas del sensor:

Tabla 19 Características tacómetro

Característica	Valor
Señal del ángulo de cigüeñal	720x0,5°
Temperatura máxima de funcionamiento	100°C
Precisión dinámica a 10000RPM	0,02°
Rango de velocidad	0-20000 RPM

Con la intención de corroborar la información entregada por el tacómetro del dinamómetro, se comparó con la señal proporcionada por la computadora controladora del motor de prueba a través del puerto OBD II obteniendo la correlación entre las dos medidas. La correlación se presenta en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** que se muestra a continuación.

Figura 31. Verificación tacómetro dinamómetro Superflow F-902



- **Sistema de medición de consumo de combustible:** Una de las variables de permanente monitoreo durante las pruebas fue el consumo de combustible apoyados en un sistema de medición compuesto por los siguientes componentes:
 - Tanque auxiliar de combustible.
 - Tubo graduado para medición de volumen.

Figura 32. Tanque auxiliar de combustible



- Cámara DVT legend vision 542C.

Figura 33. Cámara DVT



- Cronómetro.
- Sensor de flujo de retorno.
- Sensor de flujo de suministro.